

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Ana Rita Eustáquio Ferraz

Mestrado em Geologia Económica
Especialização em Prospeção Mineral

Relatório de Estágio orientado por:
Maria Isabel Gonçalves Fernandes
António Santos Silva

2017

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Ana Rita Eustáquio Ferraz

Mestrado em Geologia Económica
Especialização em Prospeção Mineral

Relatório de Estágio orientado por:
Maria Isabel Gonçalves Fernandes
António Santos Silva

2017

À Minha Mãe, Sandra C. B. Eustáquio Ferraz

Agradecimentos

São inúmeras as pessoas que permitiram o desenvolvimento deste trabalho e a quem devo expressar os meus agradecimentos. Contudo, na impossibilidade de citar cada uma delas, a todas dirijo os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, o meu reconhecimento é direcionado à Professora Maria Isabel Fernandes, orientadora científica desta tese, pela sua dedicação e paciência com que orientou o meu trabalho. Agradeço-lhe todos os conhecimentos concedidos e as palavras de encorajamento que me dispensou, bem como, toda a atenção e disponibilidade manifestadas. O meu muito obrigado, sentido, por todas as palavras de incentivo e pela confiança e amizade demonstradas.

Ao Doutor António Santos Silva, co-orientador da tese, agradeço o apoio, o apreço demonstrado e o ter feito parte desta minha jornada. Acima de tudo, um obrigado por todos os ensinamentos que prestou e as proveitosas sugestões fornecidas. Ao LNEC, nomeadamente aos elementos do Laboratório de Ensaios de Materiais e Revestimentos Inorgânicos e, em especial à Dora Soares por toda a disponibilidade e ajuda na realização de alguns ensaios de laboratório.

Ao Professor Álvaro Pinto pelas sugestões e ensinamentos num método completamente novo para mim, bem como pelas palavras de amigo e preocupação que teve para comigo durante todo o processo. O meu profundo agradecimento por me ajudar a crescer, na vida académica e como pessoa.

Aos Docentes do Mestrado em Geologia Económica, os Professores Doutores António Mateus, Miguel Gaspar, Jorge Figueiras e Mário Abel, agradeço todo o ensino fornecido, que permitiu alargar em muito os meus conhecimentos, assim como a disponibilidade que sempre tiveram para esclarecimento de dúvidas. Ao Doutor Pedro Rodrigues pela sua contribuição nas análises com microsonda eletrónica, à Doutora Cynthia Mourão pelo fabrico das lâminas delgadas e à Técnica Superior Vera Lopes pelo material disponibilizado.

Aos meus pais por todas as palavras de incentivo e confiança absoluta nas minhas capacidades, bem como pelo amor e ajuda que sempre me deram. À minha irmã por todo o seu carinho e pela compreensão demonstrada nos momentos mais complicados, assim como pela capacidade de tornar estes mais fáceis. Aos meus avós e restante família pelos momentos felizes que sempre me proporcionaram e pelo incentivo que me deram para realizar os meus sonhos. Às pessoas que se tornaram uma família para mim em Lisboa.

À Teka pelo seu carinho, pela disponibilidade em todos os momentos e atenção sem reservas. Aqui lhe exprimo a minha gratidão pelo seu caloroso acolhimento. À Carmem Pinto por ser o apoio imprescindível de uma segunda mãe em Lisboa. À Daniela, Catarina Pinto e Joana Real por todos os momentos de amizade e apoio constante.

A todos os meus amigos pela paciência demonstrada nas alturas complicadas e pela força que me deram para as superar, pelos momentos memoráveis que comigo passaram – peço aqui desculpa por outros que não aconteceram devido à distância e falta de tempo. Em especial, quero agradecer à Karoline Souza, Marta Rente, Inês Carvalho, Jorge Marques, Guillaume Fukatsu, André Santos, Catarina Dias e Rui Gonçalves por partilharem todos esses momentos.

Aos meus colegas de mestrado e amigos da FCUL pelos momentos de entusiasmo partilhados em conjunto, pela ajuda sempre pronta e pelos bons momentos que passamos nesta etapa: Maja Vučković, Joana Ferreira, Gessica Spinelli, Cristiana Esteves, Filipe Ribeiro, Frederico Martins, Hugo Esteves, Marcelo Silva, Filipa Luz, José Roseiro, Sofia Pereira, Joana Carvalho, Alex Righetti, Miguel Santos, Ivo Martins, Bruno Barros e José Vele.

Ao grupo de saltos do clube de atletismo ESCMOV por todos os momentos de amizade em grupo e pelas palavras de incentivo: Pedro Gonçalves, Francisco Cordoeiro, André Silva, Isaac Lopes, Mariana Oliveira, Oscar Vilaça, Hemilton Costa e Andreia Nicolau.

A todos os meus amigos de ERASMUS que sempre estiveram presentes mesmo a distâncias consideráveis, pelas suas palavras de afeto e estímulo e pela alegria partilhada: Maddi Bilbao, Mario Rossien, Thomas Zakaluk, Jacques Julio, Alejandro Avilés, Martin del Rio, Clara Barátta e Maria Urbistundo. Aos meus colegas e amigos de uma antiga casa (FCUP) por todos os momentos de amizade e palavras de incentivo: Carolina Gonçalves, Teresa Costa, Hugo Martins, Tiago Falcão e João Rocha.

Quiero agradecer al profesor José Fernando Simancas Cabrera por los enseñamientos en geología y por el cariño demostrado durante mi ERASMUS. Gracias por me hacer enamorar de nuevo y más por una ciencia como la geología.

Enfim, agradeço a todos os outros que não consigo aqui citar e que, de um modo ou de outro, tornaram possível e mais fácil a realização deste trabalho.

Resumo

Os granitos são rochas essencialmente constituídas por quartzo, micas e feldspatos. Estes últimos minerais são aqueles que, nestas rochas, contêm mais elementos alcalinos, assim, são também os que, em condições específicas são passíveis de libertar esses elementos na forma de iões.

As reações álcalis-sílica (RAS) são reações químicas que ocorrem no betão entre formas de sílica presentes nos agregados e os iões alcalinos (álcalis) existentes na solução intersticial. De acordo com a literatura, os agregados graníticos são considerados de reação lenta quando utilizados em betão, indicando que as reações apenas se manifestam algumas décadas após a construção. Verifica-se, no entanto, a existência de numerosas estruturas onde foram empregues agregados graníticos e que apresentam problemas relacionados com RAS.

Tendo em conta esta problemática, os agregados de natureza granítica têm sido alvo de estudo detalhado em Portugal com vista à caracterização da sua reatividade potencial, considerada de reação lenta, devido à presença frequente de quartzo deformado e/ou microcristalino. Adicionalmente há a considerar nestas rochas a presença de feldspatos que podem libertar álcalis para a solução intersticial do betão e assim contribuir para a ocorrência de RAS.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a possível libertação de álcalis por um conjunto de sete agregados graníticos portugueses previamente estudados quanto à sua reatividade potencial aos álcalis. Assim, realizou-se a análise petrográfica com especial ênfase no estudo dos feldspatos presentes e o seu grau de alteração, cuja quantificação foi realizada a partir da análise de imagem de fotografias obtidas ao microscópio ótico. Cada agregado foi dividido em frações que apresentavam diferentes graus de alteração para realização de ensaios de avaliação da libertação de álcalis em solução alcalina de acordo com a metodologia prevista na recomendação RILEM AAR-8.

Foram realizados alguns ensaios complementares de avaliação da reatividade destas rochas, nomeadamente usando prismas de betão que haviam submetidos previamente a ensaios de expansão acelerada, em particular o designado por Gel Pat Test, com o objetivo de observar a formação de gel sílico-alcalino sobre partículas de agregado quando o betão é exposto a uma solução fortemente alcalina. Foram ensaiados blocos de granito porfiróide em duas frações – sã e alterada, que foram submetidas a ataque químico de NaOH a fim de determinar se a sua estabilidade química é afetada por um meio com características semelhantes às do betão.

Os resultados obtidos permitiram concluir que os feldspatos, quando submetidos a condições similares às da solução intersticial do betão, libertam álcalis para essa solução, sendo essa libertação mais intensa no granito sã, ou seja, o grau de alteração dos minerais vai condicionar a maior ou menor libertação de álcalis.

Conclui-se ainda, a partir dos estudos realizados, que ensaios como a análise petrográfica e a análise de imagem constituem métodos importantes na caracterização de um agregado, permitindo realizar uma descrição e classificação inicial de forma rápida e expedita. No entanto, ensaios como o ataque químico a feldspatos e o Gel Pat Test deverão ser estudados mais aprofundadamente de forma a serem aplicados corretamente a agregados de reação lenta, como os granitos, uma vez que neste trabalho os resultados obtidos não foram esclarecedores. Salienta-se que a utilização de diferentes métodos é crucial para a previsão do comportamento de um agregado quando utilizado em betão.

Palavras-Chave: Álcalis, libertação de álcalis, feldspato, reatividade, betão, reações álcalis-sílica, granito.

Abstract

Granites are rocks essentially composed by quartz, micas and feldspars, the latter being the minerals which, in these rocks, contain more alkalis in their structure and thus, able to release them under specific conditions. Alkali-silica reactions (ASR) are chemical reactions that occur in concrete, between the silica reactive forms that are present in the aggregates and alkalis of the concrete interstitial solution. According to the literature, granite aggregates are considered of slow reaction when used in concrete, indicating that the effects of such reactions are only manifested several years after the construction takes place. However, there is an existence of innumerable structures where granite aggregates were employed that show ASR-related problems. Considering this, a large number of different Portuguese granitic aggregates were studied with the aim of characterizing its potential reactivity. The presence of deformed or microcrystalline quartz causes the reactions to be slower and the feldspars can potentially release alkalis to the interstitial solutions in the concrete, favouring the progression and development of ASR. For evaluating the possibility of alkalis-release, seven different Portuguese granite aggregates were petrographically analysed, with special emphasis on the characterization of the feldspars and the intensity of their alteration. This alteration was quantified combining petrography and microphotographs image analysis. Each aggregate was divided in fractions, according to the observed alteration intensity and alkali-release potential tests, using alkaline solutions were performed, according to the RILEM AAR-8 methodology. A complementary test was also carried out, to evaluate the rocks reactivity, using concrete prisms, which previously underwent accelerated expansion tests. This experiment, named Gel Pat Test, assesses the potential for the formation of silico-alkaline gel. Non-altered and altered granite single feldspar crystals were also subjected to chemical reaction with NaOH to determine if their chemical stability is affected, when placed under similar conditions as the ones found in concrete. Contrary to what's been described in previous works that used similar procedures, it was proven that the aggregate particles that show more intense alteration evidences are found to release a smaller amount of alkalis. This allowed to also prove that the feldspar, when in chemical conditions similar to the ones which are found within the concrete, can release alkalis into the interstitial solutions. Additionally, this study allowed to establish petrographic and image analysis as important processes for determining the reactivity of an aggregate, allowing an initial expedite classification and selection. Some tests, such as chemical attacks to feldspars and the Gel Pat Test should be further studied, in detail, so that they can be correctly applied to granitic aggregates, as the obtained results weren't conclusive. It is also emphasized that the combination of different methods is crucial for the correct determination of the aggregates reactivity.

Keywords: Alkalis, alkali release, feldspar, reactivity, concrete, alkali-silica reactions, granite.

Índice

Agradecimentos.....	II
Resumo	III
Abstract	V
Índice	VII
Lista de Figuras	XII
Lista de Tabelas.....	XVII
Lista de Abreviaturas.....	XIX
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do problema.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização do Trabalho.....	3
2. Enquadramento Teórico	5
2.1. Betão	5
2.2. Cimento	5
2.3. Agregados	7
2.3.1. Características dos agregados	8
2.4. Interface pasta de cimento-agregado	9
2.5. Deterioração do betão	10
2.6. Reações causadoras de deterioração do betão	10
2.6.1. Humidade	11
2.6.2. Álcalis e pH do cimento	11
2.6.3. Sílica.....	13
2.6.4. Mecanismo reacional da RAS.....	13
2.7. Reatividade potencial das rochas graníticas.....	14
2.7.1. Granitos e granitóides de Portugal	15
3. Materiais e Métodos	17
3.1. Materiais.....	17
3.2. Métodos.....	19
3.2.1. Microscopia ótica – análise petrográfica.....	19
3.2.2. Análise de imagem	20
3.2.3. Microscopia eletrónica de varrimento e microanálise de raios X por dispersão de energia (MEV/EDS)	20
3.2.4. Microsonda eletrónica (EPMA)	21
3.2.5. RILEM AAR-8	21
3.2.6. Gel Pat Test	22

3.2.7.	Ataque a feldspatos com solução alcalina.....	23
4.	Resultados	24
4.1.	Análise química.....	24
4.2.	Petrografia, análise de imagem e ensaio AAR-8	25
4.2.1.	Agregado GR2.....	25
4.2.1.1.	Análise Petrográfica.....	25
4.2.1.2.	AAR-8	28
4.2.2.	Agregado GR13.....	29
4.2.2.1.	Análise petrográfica.....	29
4.2.2.2.	AAR-8	30
4.2.3.	Agregado GR18.....	32
4.2.3.1.	Análise petrográfica.....	33
4.2.3.2.	AAR-8	34
4.2.4.	Agregado GR21.....	37
4.2.4.1.	Análise petrográfica.....	37
4.2.4.2.	AAR-8	40
4.2.5.	Agregado GR23.....	41
4.2.5.1.	Análise petrográfica.....	42
4.2.5.2.	AAR-8	44
4.2.6.	Agregado GR24.....	45
4.2.6.1.	Análise petrográfica.....	45
4.2.6.2.	AAR-8	46
4.2.7.	Agregado GR29.....	49
4.2.7.1.	Análise petrográfica.....	49
4.2.7.2.	AAR-8	50
4.2.8.	Síntese da análise petrográfica, análise de imagem e AAR-8	52
4.3.	Gel Pat Test	53
4.4.	Resultados do ataque alcalino.....	61
5.	Discussão	63
5.1.	Análise química de rocha total	63
5.2.	Petrografia e análise de imagem	64
5.3.	Ensaio AAR-8	67
5.4.	Gel Pat Test	70
5.6.	Ataque químico a feldspatos.....	72
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	73
7.	Referências bibliográficas	76

Anexo 1.....	81
Anexo 2.....	85
Anexo 3.....	89
Anexo 4.....	93
Anexo 5.....	97
Anexo 6.....	101
Anexo 7.....	105
Anexo 8.....	109
Anexo 9.....	135
Anexo 10.....	139

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Indicação aproximada dos locais de amostragem dos agregados estudados (sem escala).....	17
Figura 4.1 - Agregado GR2 (grelha de 1cm); A-Fração de granito são (GR2 - N); B - Fração de granito alterado (GR2 - A).	25
Figura 4.2 – Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR2.....	26
Figura 4.3 – A) Microclina com inclusões de plagioclase (Fração GR2-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração mais intensa da plagioclase; C) Cristal de plagioclase junto a outro de microclina (Fração GR2-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração mais intensa na plagioclase; E) Megacristal de ortoclase com inclusões de plagioclase e moscovite orientada (Fração GR2-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração da ortoclase; G) Cristais de plagioclase separados por um corredor de quartzo subgranulado (Fração GR2-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Subgranulação intensa de cristais de quartzo e moscovite entre dois cristais de plagioclase (Fração GR2-A); J) Cristais de biotite curvados e alongados e moscovite tardia de pequenas dimensões ao longo da fratura (Fração GR2-A); (fotomicrografias em NX).....	27
Figura 4.4 – Gráfico A - Liberação de sódio das duas frações do agregado GR2; Gráfico B - Liberação de potássio das duas frações do agregado GR2; Gráfico C - Liberação de Na ₂ O _{eq} das duas frações do agregado GR2.	28
Figura 4.5 - Agregado GR13 (grelha de 1cm); A-Fração de granito são (GR13-N); B - Fração de granito alterado (GR13-A).	29
Figura 4.6 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR13.	30
Figura 4.7 - A) Cristal de plagioclase junto a de um outro de microclina, ambos com indícios de alteração (Fração GR13-A; B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de plagioclase com maclas pouco nítidas (Fração GR13-N); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais e a fraturação; E) Cristal de plagioclase em megacristal de microclina (Fração GR13-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de biotite e de plagioclase em microclina (Fração GR13-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a forte alteração dos feldspatos; I) Moscovite anédrica com franjas simpletíticas entre cristais de maiores dimensões (Fração GR13-N); J) Catáclase de cristais de quartzo mais intensa (Fração GR13-A) (fotomicrografias em NX).	31
Figura 4.8 - Gráfico A - Liberação de sódio das duas frações do agregado GR13; Gráfico B - Liberação de potássio das duas frações do agregado GR13; Gráfico C - Liberação de Na ₂ O _{eq} das duas frações do agregado GR13.....	32
Figura 4.9 - Agregado GR18 (grelha de 1cm); A) Fração de granito são (GR18-N); B) Fração com feldspatos avermelhados (GR18-V); C) Fração de granito alterado (GR18-A).	33
Figura 4.10 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR18.	34
Figura 4.11 – A) Plagioclase zonada, com alteração mais intensa no núcleo (Fração GR18-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Dois cristais de plagioclase junto a quartzo (Fração GR18-A); D) Imagem obtida	

através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Cristal de plagioclase bastante alterado e biotite cloritizada (Fração GR18-V); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Megacristal de microclina com inclusões de plagioclase e biotite (Fração GR18-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Fraturas intracristalinas num cristal de quartzo preenchidas por moscovite (Fração GR18-N); J) “kink folds” em cristais de biotite e moscovite (Fração GR18-V) (fotomicrografias em NX).35

Figura 4.12 - Gráfico A - Libertação de sódio das três frações do granito GR18; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR18; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das três frações do agregado GR18.....36

Figura 4.13 - Frações do agregado GR21 (grelha de 1cm); A - Fração de granito são (GR21-N); B - Fração sã com feldspatos avermelhados (GR21-V); C - Fração de granito alterado (GR21-A).37

Figura 4.14 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR21.38

Figura 4.15 – A) Cristais de plagioclase de pequenas dimensões (Fração GR21-V); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração e rede de fraturação; C) Moscovite de pequenas dimensões nos limites de um cristal desenvolvido de plagioclase (fração GR21-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Megacristal de plagioclase com indícios de alteração (Fração GR21-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração mais intensa no núcleo do cristal; G) Plagioclase com rede de fraturação proeminente, por vezes preenchida por moscovite (Fração GR21-V); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração do cristal; I) encurvamento de cristais de biotite e moscovite (Fração GR21-N); J) Subgranulação de cristais e franjas simpletíticas em moscovite (Fração GR21-V); (fotomicrografias em NX).39

Figura 4.16 - Gráfico A - Libertação de sódio das três frações do agregado GR21; Gráfico B - Libertação de potássio das três frações do agregado GR21; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das três frações do agregado GR21.....40

Figura 4.17 - Agregado GR23 (grelha de 1cm); A - Fração de granito são (GR23-N); B - Fração de granito alterado (GR23-A).41

Figura 4.18 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR23..42

Figura 4.19 – A) Cristais de plagioclase com indícios de alteração (Fração GR23-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração da plagioclase; C) Megacristal de microclina com albitização e inclusões de biotite (Fração GR23-A);D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração e fraturação; E) Cristal de ortoclase com macla de Carlsbad (Fração GR23-N); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração do feldspato; G) Cristal de ortoclase pertítico (Fração GR23-N); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Fraturas reenchidas por moscovite e silimanite (GR23-A); J) Cristal de moscovite contendo silimanite e mostrando franjas simpletíticas (Fração GR23-A); (fotomicrografias em NX).....43

Figura 4.20 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR23; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR23; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das duas frações do agregado GR23.44

Figura 4.21 - Agregado GR24 (grelha de 1cm); A - Fração de granito são (GR24-N); B - Fração de granito alterado (GR24-A).	45
Figura 4.22 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR24.	46
Figura 4.23 - A) Plagioclase zonada, com maior alteração apenas em algumas zonas (Fração GR24-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de plagioclase zonado com alteração (Fração GR24-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração mais intensa no núcleo; E) Cristal de plagioclase zonada, com maior alteração apenas em algumas zonas (Fração GR24-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de plagioclase zonado com sinais de alteração (Fração GR24-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Domínio da rocha de menor granularidade (Fração GR24-N); J) Mirmequites na orla de cristal de plagioclase (Fração GR24-A); (fotomicrografias em NX)..	47
Figura 4.24 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR24; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR24; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das duas frações do agregado GR24.	48
Figura 4.25 - Agregado GR29 (grelha de 1cm); A - Fração de granito são (GR29-N); B - Fração de granito alterado (GR29-A).....	49
Figura 4.26 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR29.	50
Figura 4.27 – A) Cristal de plagioclase e moscovite alterada (Fração GR29-A); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de microclina com alteração mais intensa no núcleo (Fração GR29-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Cristais de plagioclase bastante alterados (Fração GR29-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de plagioclase com sinais de alteração e fraturação (Fração GR29-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Cristais de moscovite e biotite alinhados (Fração GR29-N); J) Cristal de moscovite predominantemente alterado ao longo dos planos de clivagem. (Fração GR29-N); (fotomicrografias em NX).	51
Figura 4.28 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR29; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR29; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das duas frações do agregado GR29.	52
Figura 4.29 - Gráfico dos dados de análise de imagem para as distintas frações dos agregados estudados.....	53
Figura 4.30 – Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR2; B) Betão com partículas de agregado GR13.	55
Figura 4.31 - Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR18; B) Betão com partículas de agregado GR21.	576
Figura 4.32 - Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR23; B) Betão com partículas de agregado GR24.	587
Figura 4.33 – Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR29.....	598

- Figura 4.34** – Fotos obtidas ao microscópio ótico de um pormenor do prisma de betão com partículas de agregado GR24: Pequena porção de PC junto a um agregado (nicóis //, A; nicóis X, B); Agregados das diferentes frações e os dois tipos de pasta de cimento (nicóis //, C; nicóis X, D); Limite entre os dois tipos de pasta de cimento sem influência de agregados grossos (nicóis //, E; nicóis X, F).59
- Figura 4.35** - Localização das análises no gel sílico-alcálico em imagem obtida ao MEV e ao microscópio ótico (N//).60
- Figura 4.36** - Q A) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito são e não sujeito a ataque; B) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito são e sujeito a ataque; C) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito alterado e não sujeito a ataque; D) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito alterado e sujeito a ataque.61
- Figura 4.37** - Feldspatos com zonamento químicos (Fotografia ao MEV).62
- Figura 5.1** - Sequência de agregados ordenados por grau crescente do conteúdo em álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) obtido por análise química de rocha total (valores expressos na Tabela 5.2).63
- Figura 5.2** - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de grau de alteração, obtida através da análise petrográfica.64
- Figura 5.3** - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de grau de alteração, obtida através da análise de imagem66
- Figura 5.4** - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de conteúdo em álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) obtido através do ensaio AAR-8.688
- Figura 5.5** - Gráfico relativo às razões Al/Ca e Si/Ca das diferentes pastas de cimento obtidas no ensaio Gel Pat Test.71
- Figura 5.6** - Gráfico relativo às razões $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ e Si/Ca das diferentes pastas de cimento obtidas no ensaio Gel Pat Test.71
- Figura A3** – Espectros EDS da pasta de cimento de coloração clara (PC; espectro superior) e da pasta de cimento de coloração escura (PE; espectro inferior).91
- Figura A7.1** - Mapas de elementos de uma área cuja pasta de cimento é maioritariamente PC e onde se observa uma partícula de agregado de quartzo: A) Foto da área analisada quimicamente; B) Mapas composicionais (elemento respetivo no canto superior direito).107
- Figura A7.2** - Mapas de elementos de uma área cuja pasta de cimento é maioritariamente PE e onde se observa uma partícula de agregado de quartzo: A) Foto da área analisada quimicamente A); B) Mapas composicionais (elemento respetivo no canto superior).108
- Figura A8.1** - Feldspato retirado da laje de granite são não submetido a ensaio: A, C, E, G; B, D, F, G.111
- Figura A8.2** - Imagens obtidas ao MEV no modo de eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativas a: A) Figura A8.3; B) Figura A8.4; C) Figura A8.5; F) Figura A8.6.112
- Figura A8.3**- Imagens ao MEV no modo de eletrões retrodifundidos (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-plagioclase; 3-biotite, 4-feldspato-K.113

- Figura A8.4** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-plagioclase; 2-feldspato-K; 3-quartzo, 4-plagioclase.....114
- Figura A8.5** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-biotite; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-plagioclase.....115
- Figura A8.6** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-apatite; 2-plagioclase; 3-plagioclase, 4-feldspato-K.....116
- Figura A8.7** - Feldspato retirado da laje de granite são: A, C, E, G (antes da realização do ensaios); B, D, F, G (após o ensaio).....117
- Figura A8.8** – Imagens de contraste topográfico obtidas ao MEV (BSE) em eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativas às: A) Figura A8.9; B) Figura A8.10; C) Figura A8.11; D) Figura A8.12.....118
- Figura A8.9** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.....119
- Figura A8.10** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-plagioclase.....120
- Figura A8.11** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.....121
- Figura A8.12** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.....122
- Figura A8.13** - Feldspato retirado da laje de granite alterado não submetido a ensaio: A, C, E, G,; B, D, F, G.....123
- Figura A8.14** – Imagem de contraste topográfico obtidas ao MEV em eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativa a: A) Figura A8.15; B) Figura A8.16; C) Figura A8.17; D) Figura A8.18.....124
- Figura A8.15** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-plagioclase.....125
- Figura A8.16** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-plagioclase; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.126
- Figura A8.17** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-quartzo; 3-quartzo, 4-quartzo.....127

- Figura A8.18** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-quartzo.....128
- Figura A8.19** - Feldspato retirado da laje de granite alterado: A, C, E, G (antes da realização do ensaios); B, D, F, G (após o ensaio).129
- Figura A8.20** - Imagem de contraste topográfico obtidas ao MEV em eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativas a: A) Figura A8.21; B) Figura A8.22; C) Figura A8.23; D) Figura A8.24.130
- Figura A8.21** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-quartzo.131
- Figura A8.22** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-quartzo.132
- Figura A8.23** - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-plagioclase.133
- Figura A8.24** - - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–plagioclase; 2-quartzo....134
- Figura A9** – Proposta de classificação de alteração para cristais de feldspato numa fração de agregado.....137
- Figura A10** – Proposta de classificação para agregado a partir das obtidas para os respetivos cristais de feldspato de cada fração141

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição do cimento portland (Neville, 2003).	6
Tabela 2.2 - Classes de resistência do cimento (NP EN 197-1, 2001).	6
Tabela 2.3 - Composição do betão em óxidos (Neville, 2003).	6
Tabela 2.4 - Características dos minerais de um agregado que podem contribuir para as RAS (fotos petrográficas em nicóis cruzados).	15
Tabela 3.1 - Lista de agregados utilizados no estudo, distinguindo as diferentes frações analisadas	18
Tabela 4.1 - Análise química de rocha total dos agregados estudados (valores expressos em %). .	24
Tabela 4.2 – Composição em álcalis dos agregados estudados (valores expressos em %).	24
Tabela 5.1 – Classificação das diferentes frações dos agregados estudados tendo em conta a alteração dos feldspatos-K e das plagioclases.....	66
Tabela 5.2 - - Sequência comparativa das diferentes frações dos agregados estudados relativamente à libertação de K ₂ O, Na ₂ O e Na ₂ O _{eq} (valores finais).	67
Tabela 5.3 - Valores de alteração (em %; análise de imagem), de libertação em % (ensaio AAR-8) e em % para análise química de rocha total de Na ₂ O _{eq}	68
Tabela A1 - Condições analíticas utilizadas na análise dos Feldspatos à EPMA.....	83
Tabela A2 - Condições analíticas utilizadas na análise da pasta de cimento à EPMA.....	87
Tabela A4.1 - Análises químicas de feldspatos ao EPMA do ensaio Gel Pat Test (em %).....	95
Tabela A4.2 – Química mineral dos feldspatos perto dos limites de agregados analisados ao EPMA na lâmina de betão submetido ao ensaio Gel Pat Test.....	96
Tabela A5.1 - Análises químicas de feldspatos ao EPMA do ensaio Gel Pat Test (em %).	99
Tabela A5.2 - Química mineral dos feldspatos do interior das partículas de agregado longe de fraturas ao EPMA na lâmina do betão submetido ao ensaio Gel Pat Test.....	100
Tabela A6 - Análises químicas de PC e PE ao EPMA após o ensaio Gel Pat Test (em %).	103

Lista de Abreviaturas

- A** – Fração composta por partículas de rocha alterada;
- Bt** – Biotite;
- CSH** – Silicatos de cálcio hidratados;
- C3S** - Silicato tricálcico;
- C2S** - Silicato bicálcico;
- C3A** - Aluminato tricálcico;
- C4AF** - Aluminoferrato tetracálcico;
- EDS** - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy;
- EPMA** - Electron Probe Microanalyze;
- FCT** – Fundação para a Ciências e a Tecnologia;
- FCUL** – Faculdade de Ciências da Universidade do Lisboa;
- Feld-K** – Feldspato potássico;
- LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
- Mcr** – Microclina;
- Msc** – Moscovite;
- N** – Fração composta por partículas de rocha sã (não alterada);
- NX**- Nicóis cruzados;
- N//** - Nicóis paralelos;
- Ort** – Ortoclase;
- PC** - Pasta de cimento de coloração clara;
- PE** - Pasta de cimento de coloração escura;
- Plg** – Plagioclase;
- RAC** - Reações álcalis-carbonato;
- RAS** - Reações álcalis-sílica;
- SEM ou MEV** - Microscopia Eletrónica de Varrimento;
- Z** - Número atómico;
- ZCI** – Zona Centro-Ibérica.

1. Introdução

1.1 Enquadramento do problema

O betão é o material mais utilizado em construção civil na atualidade devido ao amplo intervalo de valores de resistência mecânica e durabilidade que pode apresentar. Na execução das grandes obras de engenharia o betão é reforçado com aço, obtendo-se o denominado “betão armado” (Neville, 2003).

A constituição do betão pode ser complexa, mas regra geral possui uma mistura de diversos componentes, entre os quais o cimento (ligante hidráulico), os agregados e a água, embora seja usual conter outros elementos, como adjuvantes e adições.

A ocorrência de ligações químicas entre o ligante (cimento) e a água dá origem à “presa” do betão e ao seu endurecimento (Neville, 2003).

Ao verificar-se um aumento da degradação de grandes estruturas, torna-se importante estudar a durabilidade do betão e os fatores que a condicionam, assim como compreender como é que a deterioração deste material ocorre ao longo do tempo. O estudo das reações químicas que se verificam entre os constituintes do betão e a forma como estas se vão processando pode ajudar a perceber as suas consequências, a longo prazo, nas propriedades do mesmo. No entanto, as reações químicas ocorrem, geralmente, de forma muito lenta e após a conclusão da obra, tornando-se necessário estudar e prever o comportamento dos componentes do betão, não só isoladamente, mas também no seu conjunto.

De entre as referidas reações químicas, encontram-se aquelas que ocorrem entre os agregados e os fluidos intersticiais do betão, designadas por “reações álcalis-agregado”. Destas distinguem-se as reações álcalis-carbonato (RAC) e as reações álcalis-sílica (RAS), sendo estas últimas as únicas conhecidas até à data em Portugal.

As reações álcalis-sílica (RAS) ocorrem entre os hidróxidos alcalinos, libertados durante a hidratação do cimento ou libertados dos agregados utilizados no betão, e as diferentes formas de sílica reativa presentes nos agregados (ACI, 1998). Para que este tipo de reações ocorra é necessário que o meio seja suficientemente húmido, exista elevado teor em álcalis (íões Na^+ e K^+) e esteja presente sílica potencialmente reativa. As RAS são reações capazes de formar produtos expansivos e assim levar à destruição do betão.

Embora os agregados graníticos sejam considerados de reatividade improvável aos álcalis, devido à estabilidade que os seus minerais usualmente apresentam, Ramos *et al.* (2016) referem que, em condições de elevada alcalinidade, como é o caso da solução intersticial do betão, os granitos podem, com o decorrer do tempo, originar RAS.

Lindgård *et al.* (2010) classificaram diferentes rochas com base em resultados de ensaios de expansão em laboratório e no comportamento desses materiais em estruturas construídas há algumas décadas. De acordo com estes estudos, os granitos foram classificados como agregados de reação lenta/retardada, a qual se manifesta, em geral, ao fim de 15 a 20 anos após a construção da obra.

Segundo Ramos (2013), em meados dos anos 50 surgiram as primeiras publicações onde se demonstrava que as reações álcalis-sílica, em rochas portadoras de quartzo, ocorriam devido a defeitos na rede cristalina deste mineral. De referir que anteriormente as características texturais das rochas utilizadas como agregados eram menosprezadas. DeHills e Corvalán (1964) correlacionaram, em rochas graníticas chilenas, o valor do ângulo da extinção ondulante em cristais de quartzo com o grau de deformação da rede cristalina. De acordo com Gogte (1973), a deformação que o quartzo apresenta está relacionada com a reatividade potencial aos álcalis do agregado, demonstrando, assim, a importância do exame petrográfico dos

agregados. Segundo este último autor, a reatividade aumentaria devido a um incremento das deslocções na rede cristalina do quartzo em resposta à deformação, o que levaria a um aumento da fragilidade das ligações entre os átomos de sílica e de oxigénio (Soares, 2014). Fernandes (2005) defende que o quartzo com intensa extinção ondulante se encontra muitas vezes associado a quartzo microcristalino, considerando-se este como uma das principais causas de reatividade de rochas graníticas.

A previsão da ocorrência ou da velocidade a que as reações álcalis-sílica ocorrem é bastante complexa, pois não tem uma relação direta com a natureza do agregado. Sendo os agregados de extrema importância no fabrico do betão torna-se necessário compreender as suas propriedades de forma a determinar como este pode relacionar-se com os outros componentes. Um mesmo mineral pode revelar-se estável ou instável, consoante os diferentes tipos de rocha em que se apresente, isto é, em certos casos os minerais poderão ser mais instáveis devido à deformação ou a outros processos geológicos decorridos na rocha correspondente. A reatividade relativa de vários minerais poderá também ser diferente de agregado para agregado. Assim, não existe um acordo relativamente às características que podem controlar a reatividade observada, nomeadamente a composição química, o estado em que se encontra a rede cristalina do quartzo, a micro-deformação e a área superficial específica (Ramos, 2013).

Para além da sílica potencialmente reativa, os granitos apresentam outros minerais, como os feldspatos e as micas, capazes de libertar Na^+ e K^+ em meios fortemente alcalinos (Constantiner e Diamond, 2003). Os feldspatos, são os minerais que contêm maiores quantidades de álcalis nas suas estruturas químicas, sendo, desta forma, os principais fornecedores dos mesmos. Diferentes tipos de feldspatos concorrem para a libertação dos álcalis, durante o desenvolvimento de RAS - o ião K^+ é libertado pelos feldspatos potássicos, como a microclina e a ortoclase, e o ião Na^+ pelas plagioclases ricas em sódio.

Nos últimos anos diversos estudos realizados no Canadá tentaram dar resposta à necessidade de classificar rapidamente um agregado quanto à possibilidade de libertar álcalis (Bérubé e Fournier, 1993; 2000). Estes estudos têm contribuído para complementar os ensaios que internacionalmente são utilizados para caracterizar a reatividade potencial de um agregado, nomeadamente:

- Ensaio Petrográfico (AAR-1.1): consiste numa caracterização petrográfica das partículas de agregado, determinando a presença das espécies minerais reativas aos álcalis;
- Ensaios Químicos (RILEM AAR-8): determinar a contribuição dos agregados para a libertação de álcalis no betão;
- Expansão de prismas de betão (EILEM AAR 3.1 ou RILEM AAR 4.1) e de barra de argamassa acelerado (ASTM C 1260 ou RILEM AAR-2): permitem determinar o grau de reatividade potencial de um agregado através da medição da expansão que uma barra de betão, ou de argamassa, composta por partículas desse mesmo agregado e por um cimento com elevado teor em álcalis;

Estes ensaios encontram-se numa fase de validação, uma vez que não se obtêm resultados satisfatórios para todos os tipos de agregados e nenhum dos métodos descritos consegue definir por si só um agregado como reativo.

1.2. Objetivos

Em Portugal, o granito é uma das rochas mais utilizadas no fabrico de betão, em especial nas zonas Norte e Centro do país onde abunda. Sendo o betão um material bastante utilizado na construção de infraestruturas, nomeadamente grandes obras de engenharia como barragens, pontes e túneis, é relevante determinar como se comportará com o decorrer do tempo, tal como já foi referido.

Têm sido desenvolvidos trabalhos de investigação com o objetivo de avaliar a reatividade potencial aos álcalis através de ensaios de expansão em laboratório. De acordo com o estado de conhecimento a nível nacional e internacional, nestes ensaios o betão é exposto a condições de humidade e temperatura extremas por forma a desencadear e acelerar a possível reação entre os álcalis existentes no fluido intersticial e o quartzo presente no agregado. Nas normas em vigor, as medidas apontadas para diminuir a ocorrência de RAS recomendam que se utilizem medidas mitigadoras de forma a evitar o seu desenvolvimento, nomeadamente pelo controlo da alcalinidade do betão ou pela introdução de adições minerais que são conhecidas por terem uma ação benéfica neste processo e na durabilidade em geral do betão. No entanto, tem sido questionada a possível contribuição de agregados com minerais contendo sódio e potássio para o aumento de álcalis no betão.

Assim, o presente trabalho pretende estudar e avaliar os possíveis fatores que influenciem a contribuição dos agregados graníticos para o aumento de álcalis no betão, e dessa forma a RAS.

Tendo em conta a problemática das reações álcalis-agregados e os minerais portadores de álcalis e de sílica presentes nas rochas graníticas, podemos enunciar como objetivos deste trabalho os seguintes:

- Caracterizar agregados graníticos portugueses, em relação à libertação de álcalis;
- Compreender o processo de alteração de feldspatos em soluções alcalinas;
- Estabelecer possíveis correlações entre os diferentes métodos de ensaio e a análise petrográfica;
- Comprovar a adequabilidade dos métodos como Gel Pat Test, usualmente aplicados a rochas de reação rápida, em rochas graníticas.

Tendo em conta os objetivos anteriormente referidos, pretende-se contribuir para uma maior e melhor compreensão da problemática das RAS, promovendo uma exploração sustentável dos agregados e a sua melhor utilização em obras de engenharia futuras. Para concretização dos objetivos estipulados submeteram-se as diferentes amostras a vários ensaios, nomeadamente:

- Análise petrográfica ao microscópio ótico de polarização para determinação da composição mineralógica da rocha e sua caracterização textural;
- Análise de imagens petrográficas, para quantificação do grau de alteração das frações estudadas;
- Ensaios de solubilidade em soluções fortemente alcalinas, tanto por ataque de superfícies polidas como de partículas obtidas por moagem;
- Gel Pat Test, para avaliação da possível formação de gel por RAS.

Também se considerou a informação obtida em ensaios anteriormente realizados, nomeadamente através da análise química de rocha total, que, em conjunto com os realizados neste trabalho, visam responder aos objetivos delineados neste relatório.

1.3. Organização do Trabalho

A tese foi estruturada de forma a introduzir de modo gradual a temática do betão, facilitando a compreensão da mesma por parte de investigadores menos familiarizados. Assim, encontra-se dividido nos seguintes pontos:

- Introdução;
- Enquadramento teórico;
- Materiais e métodos;
- Apresentação de resultados;

- Discussão de resultados;
- Conclusões e desenvolvimentos futuros.

No primeiro capítulo deste relatório faz-se uma pequena introdução da problemática, apresentaram-se os objetivos do trabalho desenvolvido e a organização da tese.

No segundo capítulo entendeu-se que seria relevante incluir um enquadramento teórico e uma revisão bibliográfica, onde se expõem aspetos relacionados com o fabrico do betão, as propriedades mais importantes dos agregados e as reações químicas que levam à degradação do betão. Este capítulo é desenvolvido tendo em conta as questões relativas à eventual reatividade das rochas graníticas e dos seus minerais.

No terceiro capítulo são descritos todos os procedimentos experimentais do trabalho e o processamento das amostras utilizadas nos mesmos. Para tal, pormenorizam-se os materiais utilizados e os procedimentos a realizar nesses ensaios, que se encontram descritos em normas ou metodologias em desenvolvimento, com particular enfoque nos métodos que permitam a medida da libertação de álcalis e na análise petrográfica.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos de forma detalhada para cada amostra nos distintos ensaios. A análise química de rocha total e o Gel Pat Test foram os métodos utilizados para os agregados referenciados por GR2, GR13, GR18, GR21, GR23, GR24 e GR29. A análise petrográfica, a análise de imagem e o ensaio AAR-8, um ensaio que visa determinar o potencial de um agregado em libertar álcalis para a solução intersticial do betão, foram empregues para as distintas frações dos agregados referidos para a análise química de rocha total. Também se descreve os resultados obtidos no ataque químico para os cristais de feldspato provenientes de granito são e alterado.

No quinto capítulo procede-se à discussão dos resultados descritos no ponto anterior e apresentam-se as conclusões acerca da estabilidade química dos agregados/minerais, fazendo-se uma comparação das diferentes amostras nos distintos ensaios.

No último capítulo do relatório referem-se as conclusões e considerações gerais do trabalho, bem como se propõem trabalhos futuros que possam responder a perguntas que tenham surgido ao longo do processo. Assim, referem-se os trabalhos a desenvolver, abordando a metodologia a implementar num futuro próximo.

O presente trabalho constitui a continuação de um estudo pormenorizado de avaliação da reatividade de agregados nacionais (Projeto FCT IMPROVE, ref^a PTDC/ECM/115486/2009).

No decorrer deste trabalho foram obtidos alguns dados e conclusões que serviram para a redação e publicação, até ao momento, de 2 artigos científicos, a saber:

- Ferraz, A. R. E.; Fernandes, I.; Soares, D.; Santos Silva, A. (2016): Avaliação da alteração das rochas graníticas e a sua influência sobre a libertação de álcalis. *VI CJIG, Estremoz, Abstracts Book*;
- Santos Silva, A.; Fernandes, I.; Ferraz, A.R.E; Soares, D. (2017): Can certain alkali minerals explain the slow reactivity of granitic aggregates in dams?. *Dam Swelling Concrete 2017*, June 13th-15th 2017, Chambéry, France.

2. Enquadramento Teórico

2.1. Betão

O betão é um material essencialmente constituído por cimento, agregados, água e, por vezes, adjuvantes e adições.

De acordo com Soares (2014), as propriedades do betão dependem de aspetos como:

- Material constituinte;
- Processo de fabrico;
- Processo de colocação em obra;
- Condições de exposição a que estará sujeito;
- Incumprimento das diferentes normas aplicáveis;
- Ausência de controlo de qualidade exigível.

Segundo a mesma autora, qualquer variação num dos parâmetros referidos influencia a qualidade do betão obtido.

O betão é um meio heterogéneo formado por três fases: uma sólida, uma aquosa e, por último, uma gasosa. A fase sólida é constituída pelos produtos de hidratação do cimento, por partículas de clínquer não hidratadas e pelos agregados. A fase aquosa provém do excesso de água na amassadura, absorvida na superfície dos poros capilares (hidratos) ou que se encontra livre na solução intersticial do betão de elevada alcalinidade ($12,6 < \text{pH} < 14$). A fase gasosa do betão é composta por ar que preenche os seus poros, podendo representar 10-20 % do volume total do mesmo. Esta fase varia ao longo do tempo, uma vez que depende da razão entre a água e o cimento utilizado (a/c), da natureza dos agregados e da idade do betão (Soares, 2014).

2.2. Cimento

O cimento é descrito na literatura como um material inorgânico granular muito fino, possuindo propriedades adesivas e coesivas, sendo assim capaz de ligar fragmentos de rocha e/ou minerais, formando um material compacto (NP EN 197-1, 2001; Neville, 2003; Fernandes, 2005).

Existem vários tipos de cimentos, dependendo das percentagens dos componentes utilizados. O cimento Portland é obtido através da mistura devidamente proporcionada de carbonato de cálcio (materiais calcários), silicatos de alumínio e de ferro (materiais argilosos) ou a partir de misturas de materiais calcários e argilosos como margas e, eventualmente, outra ou outras substâncias apropriadas ricas em sílica, alumina e ferro. Após serem reduzidos a pó, estes materiais são submetidos a temperaturas elevadas, da ordem dos 1450 °C, em grandes fornos rotativos, formando-se após arrefecimento o “clínquer” (NP EN 197-1, 2001).

De acordo com Neville (2003), o cimento Portland é uma mistura proporcionada de clínquer e de gesso ($\pm 5\%$), bem como de outros aditivos, apresentando este cimento a composição expressa na Tabela 2.1.

A utilização de gesso, no fabrico do cimento, deve-se ao facto de este atuar como um retardador de presa, uma vez que intervém na hidratação do aluminato tricálcico, um dos componentes do clínquer do cimento (St John *et al.*, 1998; Fernandes, 2005).

Tabela 2.1 - Composição do cimento portland (Neville, 2003).

Óxidos	Teor (%)
CaO (cal)	60 - 67
SiO ₂ (sílica)	17 - 25
Al ₂ O ₃ (alumina)	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,5 - 6,0

Existem diferentes tipos ou famílias de cimentos dependendo da composição e/ou distintas classes de resistência à compressão de referência (32,5; 42,5; 52,5). Para cada uma destas classes são estabelecidas duas classes de resistência nos primeiros dias, associadas à resistência aos 2 e aos 7 dias de idade: uma classe de resistência normal, designada por N (normal), e uma classe de resistência elevada, R (rápido; NP EN 197-1, 2001; Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Classes de resistência do cimento (NP EN 197-1, 2001).

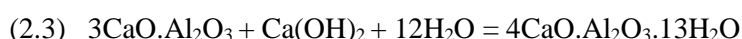
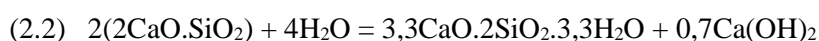
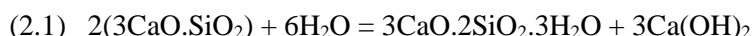
Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)				Tempo de início de presa (min)	Expansibilidade (mm)
	Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência			
	2 dias	7 dias	28 dias			
32,5 N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	—				
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 10,0	—				
52,5 N	≥ 10,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45	
52,5 R	≥ 10,0	—				

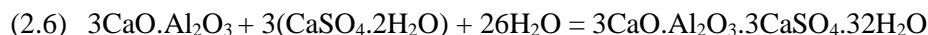
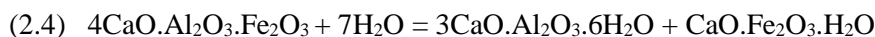
A composição do cimento, de acordo com Neville (2003), é usualmente apresentada sob a forma de óxidos, tal como se encontra representado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Composição do betão em óxidos (Neville, 2003).

Substância	Abreviatura	Formula química	Percentagem
Silicato tricálcico	C3S	3Ca.SiO ₂	50 – 70
Silicato bicálcico	C2S	2Ca.SiO ₂	15 – 30
Aluminato tricálcico	C3A	3CaO.Al ₂ O ₃	5 – 10
Alumino ferrato tetracálcico	C4AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	5 – 15

Tendo em conta que o cimento, quando misturado com água, forma um sólido resistente convém entender as reações químicas que ocorrem na formação do cimento endurecido. Essas reações de hidratação são espaçadas no tempo e podem ser divididas em dois períodos, a “presa” e o “endurecimento”, originando-se diversos compostos (Coutinho, 1988).





No decorrer do referido processo ocorre a hidratação dos silicatos bicálcico e tricálcico, originando-se hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e silicatos de Ca hidratados ou CSH (*Calcium Silicate Hydrates*). O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libertado fica em solução ou cristaliza formando portlandite, correspondendo a 20-25 % da pasta hidratada. Os CSH apresentam uma textura fibrosa e representam 50-60 % do volume da pasta de cimento. Estes últimos apenas são estáveis quando se encontram em contacto com soluções alcalinas de pH entre 11,00 e 12,34 (pH característico da pasta de cimento hidratado), e sobressaturadas em hidróxidos de Ca (Rendell *et al.*, 2002).

O aluminato tricálcico e o aluminoferrato tetracálcico, por reação com o sulfato de cálcio hidratado (gesso), originam o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite). A etringite é estável na presença de gesso, no entanto, torna-se instável quando este se esgota, originando monossulfato de cálcio hidratado.

2.3. Agregados

Os agregados, segundo Fernandes (2005), correspondem a $\frac{3}{4}$ do volume total do betão (70-80 %) e referem-se a partículas de materiais granulares de natureza mineral adequados para a utilização em argamassas e betão. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção (NP EN 206-1: 2007). Estes produtos são aplicados por razões económicas, uma vez que o processo de fabrico do betão seria bastante mais dispendioso se estes não fossem utilizados pois isso implicaria a aplicação de maiores quantidades dos restantes componentes.

As propriedades físicas e químicas dos agregados são definidas pelas suas composições mineralógicas e texturais, bem como pelo grau de alteração das partículas minerais e/ou rochosas que os constituem (Sims e Brown, 1998).

Os agregados podem ser classificados de acordo com diferentes normas, dependendo do ponto de vista adotado. A mais simples tem em conta a sua origem, isto é, se são agregados artificiais, resultantes de uma britagem de rocha explorada em pedreiras, ou se foram obtidos a partir de explorações de materiais granulares em depósitos naturais (Fernandes, 2005). Podem ainda dividir-se em finos (0,063 mm) e agregados grossos e finos (4 mm; NP EN 12620, 2004). No presente, uma das classificações empregues baseia-se na divisão tradicional, quanto à origem da rocha mãe dos agregados: ígneas, sedimentares ou metamórficas. Não obstante, esta informação é insuficiente para classificar os agregados de acordo com a sua reatividade, sendo assim crucial realizar-se uma descrição pormenorizada do tipo de agregado, bem como uma caracterização petrográfica do mesmo (Fernandes, 2005). Este estudo petroográfico consiste numa descrição da composição do agregado em termos de identidade mineralógica, textural e petrográfica. Tendo em conta todos estes aspetos, é possível inferir a qualidade dos agregados que irão ser utilizados no betão, detetando-se assim substâncias potencialmente nocivas ao mesmo. Saliente-se, no entanto, que a melhor forma de determinar a reatividade potencial de um agregado é avaliar o seu comportamento em obra (Neville, 2003; Fernandes, 2005).

A descrição petrográfica do tipo de agregado consiste numa caracterização da rocha presente, devendo nela constar informações relativas à granularidade dos seus principais constituintes, textura, anisotropia, cor, composição mineralógica e respetivas proporções aproximadas, bem como o seu estado de alteração

(Fernandes, 2005). Esta descrição poderá incluir algumas notas em relação à eventual presença de minerais que podem ser prejudiciais (Soares, 2014), nomeadamente:

- Sulfuretos;
- Gesso, anidrite;
- Óxidos de ferro;
- Sílica, na forma de opala, calcedónia e polimorfos de quartzo (cristobalite e tridimite);
- Dolomite;
- Feldspatos potássicos, sódicos ou calco-sódicos ou produtos da sua alteração.

2.3.1. Características dos agregados

As características finais do betão são desde logo condicionadas pelas características físicas e mecânicas dos agregados. Coutinho (1999) e Soares (2014) enumeraram distintas propriedades dos agregados que podem influenciar as características apresentadas pelo betão:

- Massa volúmica;
- Granulometria;
- Forma das partículas de agregado;
- Porosidade;
- Permeabilidade;
- Presença de substâncias nocivas (ex. argila);
- Coeficiente de dilatação térmica;
- Textura das partículas de agregado.

De forma sucinta caracterizam-se, em seguida, estas propriedades.

A massa volúmica é descrita como sendo o quociente entre a massa e o volume de um determinado material (granito 2600-2700 kg/m³) e depende dos minerais constituintes e do seu teor em vazios (NP EN 12620, 2004). Este parâmetro permite determinar a quantidade adequada de agregados a aplicar em obra (Fernandes, 2005).

A granulometria dos agregados é um parâmetro que descreve a quantidade de partículas que passam num conjunto de peneiros de malha específica, sendo expressa em percentagem (NP EN 12620, 2004). Esta característica afeta a trabalhabilidade, a resistência, a densidade por compactação e a economia do betão (French, 1991). Os agregados grossos aumentam a resistência do betão mas, por sua vez, diminuem a sua trabalhabilidade. Em contrapartida, os agregados finos incrementam este último parâmetro e reduzem o primeiro. Assim, materiais com curvas granulométricas suaves produzem melhores resultados, pois contêm partículas que favorecem os dois parâmetros. No entanto, a utilização de agregados de grandes dimensões permite a aplicação de menores quantidades de cimento e evitam a geração de temperaturas elevadas durante as reações de hidratação (Coutinho, 1999; Soares, 2014).

A forma das partículas é descrita com base no seu arredondamento e esfericidade. O arredondamento é considerado uma medida da angularidade relativa dos bordos das partículas e relaciona-se com a origem do agregado, uma vez que depende da resistência à abrasão da rocha e dos processos de britagem a que esta possa ter sido submetida (Soares, 2014). Este parâmetro afeta a ligação entre o cimento e o agregado, podendo ocorrer o desenvolvimento de fissuras nas interfaces em certas condições, e também a necessidade de maiores quantidades de água, devido à maior superfície que os agregados poderão apresentar (Fernandes, 2005). A esfericidade é definida pela razão entre a área superficial de uma partícula e o seu volume e

depende do tipo de rocha (NP EN 12620, 2004; Soares, 2014). Por exemplo, se os planos de descontinuidade se encontrarem bastante próximos uns dos outros, as partículas serão alongadas, podendo levar à acumulação de água na secção inferior da estrutura quando aplicadas ao betão (Fernandes, 2005). Isto impediria uma boa ligação entre pasta de cimento-agregado, já que a água se encontraria mal distribuída.

Daqui decorre que, no fabrico de betão, se procure obter partículas de agregados que apresentem maior esfericidade e angulosidade, de forma a permitir uma melhor ligação entre a pasta cimento-agregado (St John *et al.*, 1998).

A presença de poros nas partículas de agregado está relacionada com a sua porosidade e permeabilidade, o que condiciona o comportamento do betão na presença de gelo e durante o processo de degelo, a sua estabilidade química e a resistência à abrasão (Neville, 2003; NP EN 12620, 2004). A porosidade, que no caso de um granito é de 0,4-3,8 % (Neville, 2003), pode permitir um maior controlo das fissuras originadas pelas reações internas, reduzindo-se assim a expansão causada pelas mesmas.

A presença de argila é outro parâmetro a ter em conta quando se classifica um agregado, pois conduz a um incremento da quantidade de água necessária para atingir a trabalhabilidade desejada, afetando a ligação entre o cimento e os agregados.

O coeficiente de dilatação térmica é utilizado como um parâmetro para avaliar o comportamento do betão a variações térmicas. Assim, os valores que a rocha apresenta, que variam com o seu teor em sílica (granito $1,8-11,9 \times 10^{-6}$), e os valores do cimento ($11-20 \times 10^{-6}$) podem comprometer as ligações entre os componentes.

A textura superficial das partículas de agregado tem implicações nas características finais do betão, uma vez que partículas mais rugosas aumentam a resistência à tração, proporcionando assim uma melhor aderência cimento-agregado e um melhor empilhamento do esqueleto granular do betão. Contudo, a trabalhabilidade deste material é afetada negativamente quando são aplicadas partículas com estas texturas.

De tudo o que foi referido, pode definir-se um conjunto de características que os agregados necessitam de apresentar para que possam ser utilizados no betão:

- Forma e dimensão proporcionadas – de acordo com as normas definidas;
- Resistência mecânica adequada;
- Propriedades térmicas adequadas;
- Propriedades químicas, relativamente ao ligante e às ações exteriores, adequadas;
- Isenção de substâncias prejudiciais.

Não obstante, para além da satisfação dos requisitos acima enunciados é ainda necessário que o agregado não interaja quimicamente com a pasta do cimento. A maioria dos agregados, no entanto, pode interagir quimicamente com a pasta do cimento, podendo assim afetar o tempo de vida útil e a resistência do betão. Saliente-se que esta interação está dependente da mineralogia do próprio agregado. Assim, os agregados podem comprometer a durabilidade do betão quando contribuem com componentes indesejáveis à mistura.

2.4. Interface pasta de cimento-agregado

A interface pasta de cimento-agregado forma-se devido ao empacotamento dos diferentes constituintes do betão e corresponde ao contacto entre o cimento e as superfícies das diferentes partículas de agregado (Soares, 2014). Nesta zona, para além do betão estar sujeito a maiores tensões, é também onde este

apresenta uma maior porosidade, uma vez que, durante a mistura, existe uma maior dificuldade em acomodar partículas secas.

A interface pasta de cimento-agregado apresenta usualmente microfissuras e, por isso, regista valores de resistência inferiores à da pasta de cimento e à dos próprios agregados, o que afeta a resistência do betão. As propriedades desta zona correspondem a uma combinação da inter-relação mecânica dos produtos de hidratação do cimento com o agregado e das reações químicas que ocorrem entre os dois componentes.

Na referida interface formam-se essencialmente hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), silicatos de cálcio hidratados (CSH) e etringite (Soares, 2014). Estes cristais encontram-se orientados preferencialmente de forma perpendicular à superfície dos agregados.

2.5. Deterioração do betão

Uma estrutura de betão é construída esperando que esta mantenha as suas características e funcionalidades durante o seu período de tempo de vida útil. A durabilidade da mesma é uma medida da resistência da estrutura de betão às condições físicas e químicas a que é exposta, e pode ser considerada como a capacidade de resistir à deterioração ambiental. A deterioração, que pode ter origem em fatores internos ou externos, resulta em geral da ação paralela de processos físicos, químicos e biológicos (Gregerová e Pospíšil, 2003, Fernandes, 2005).

Relativamente às diversas causas de deterioração do betão serão apenas abordadas, neste trabalho, as de origem química que envolvam os principais constituintes do betão, nomeadamente os agregados e o cimento, e onde a petrografia possa ser utilizada como técnica essencial de diagnóstico.

2.6. Reações causadoras de deterioração do betão

Na literatura são definidos dois tipos de reações químicas que podem afetar a durabilidade do betão: o ataque por sulfatos e as reações álcalis-agregado, onde se enquadram as reações álcalis-carbonato e as álcalis-sílica.

As reações álcalis-agregado caracterizam-se pela capacidade de formarem compostos expansivos e de nelas intervirem iões de sódio e potássio que se encontram na solução intersticial do betão, provenientes de alguns minerais de certos agregados e da pasta de cimento utilizada (St. John *et al.*, 1998). Existem dois tipos de reações álcali-agregado (RILEM AAR-0, 2016):

- Reações álcalis-carbonato (RAC);
- Reações álcalis-sílica (RAS).

As designadas por reações álcalis-silicato são, nesta versão mais recente da recomendação RILEM AAR-0 (2016) consideradas como uma variante das reações álcalis-sílica.

As reações álcalis-sílica (RAS), que serão estudadas neste trabalho, são as reações álcalis-agregado mais frequentes, e ocorrem entre os álcalis e os agregados contendo sílica utilizados no betão. Os álcalis provêm essencialmente dos hidróxidos alcalinos presentes na solução intersticial do cimento libertados durante a hidratação. No entanto, alguns tipos de agregados podem também libertar álcalis ao longo do tempo (Fernandes, 2005).

Para que este tipo de reações se manifeste é necessário que o meio seja suficiente húmido, com um elevado teor em álcalis (íões Na^+ e K^+) e que exista sílica solúvel reativa. Desta forma, um modo de evitar o avanço das mesmas é conseguir que uma destas condições não se verifique.

2.6.1. Humidade

A água é um fator importante para a ocorrência de reações álcalis-sílica, uma vez que contribui para o transporte de catiões alcalinos (íões Na^+ e K^+) e íões OH^- no interior do betão. Por outro lado, é absorvida pelo gel sílico-alcalino resultante de RAS, podendo originar fissuras no betão devido à expansão deste produto de reação (Poole, 1992). A humidade necessária à progressão das reações pode encontrar-se sob a forma de água livre no interior do betão ou ser proveniente do exterior (LCPC, 1994).

Existem diversas classificações para determinar o grau de ataque de um betão tendo em conta a humidade. Atualmente a mais utilizada baseia-se no tipo de ambiente a que o betão será exposto após a sua colocação em obra (LCPC, 1994; Nixon *et al.*, 2004): seco, húmido, húmido com gelo e sais descongelantes, marítimo e agressivo.

2.6.2. Álcalis e pH do cimento

É usual encontrar álcalis na pasta de cimento sob a forma de sulfatos, como a tenardite (Na_2SO_4), a arcanite (K_2SO_4), o sulfato duplo de sódio e de potássio ($(\text{Na},\text{K})_2\text{SO}_4$) e a langbeinite ($\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$).

A origem destes álcalis é diversa podendo provir de minerais dos agregados (feldspatos, ilite e micas) ou de fontes externas (contacto com a água do mar, utilização desta na amassadura e de químicos para acelerar o degelo). Contudo, segundo Soares (2014), apenas os “álcalis ativos”, isto é, os que não estão incorporados em estruturas cristalinas de silicatos de cálcio hidratado ou nos próprios agregados, poderão intervir nas reações álcalis-sílica.

Uma elevada concentração de álcalis incrementa o número de íões hidroxilo e o pH do meio, proporcionando condições favoráveis à ocorrência de RAS. Um betão com teor baixo de álcalis possui pH entre 12,7-13,1 enquanto um betão que apresente alto teor de álcalis apresenta valores entre 13,5-13,8 de pH (Hobbs, 1988). Salienta-se que quanto maior for o valor de pH no betão, maior será a disponibilidade dos agregados para libertarem álcalis (Soares, 2014). Também a lixiviação dos minerais alcalinos ocorre preferencialmente em zonas mais frágeis do betão, onde as fraturas permitem a progressão das reações.

Menéndez *et al.* (2012) analisaram as mudanças ocorridas nas fácies alcalinas e nos álcalis libertados de agregados graníticos expostos às soluções alcalinas contendo Ca, Ca+Na, Ca+K durante um elevado período de tempo. Segundo estes autores, os principais minerais responsáveis pela libertação de álcalis são os feldspatos alcalinos. A alteração de certos minerais portadores de sódio e potássio, maioritariamente feldspatos, pode contribuir significativamente para a libertação de álcalis.

Os feldspatos correspondem a um grupo de minerais com a fórmula química geral YX_4O_8 , onde a posição “Y” é ocupada por catiões Si^{4+} e Al^{3+} em coordenação tetraédrica, sendo a posição “X” ocupada por um catião de sódio (Na^+) e/ou de cálcio (Ca^{2+}) e/ou potássio (K^+) (Deer *et al.*, 2000). A sua estrutura cristalina consiste numa rede de tetraedros de SiO_2 e AlO_4 . A composição mineralógica da maioria dos feldspatos pode ser expressa dentro do sistema ternário constituído por ortoclase (KAlSi_3O_8), albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e anortite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Os minerais cuja composição se encontra entre a referida para a albite e para a anortite são denominados por plagioclases, enquanto os que estão compreendidos entre a albite e a ortoclase

denominam-se feldspatos alcalinos, devido à presença de álcalis como o sódio e o potássio na sua composição química (Deer *et al.*, 2000).

Nestes minerais, o K^+ liberta-se mais facilmente em feldspatos potássicos e o Na^+ em feldspatos sódicos (plagioclases). No entanto, a libertação de K^+ não é igual em todos os feldspatos potássicos. Tal deve-se à disponibilidade de cada ião relacionada com a composição química e estrutura do feldspato (Constantiner e Diamond, 2003). Segundo o mesmo autor, a remoção de álcalis em feldspatos ricos em sódio é mais rápida do que em minerais deste tipo ricos em potássio, devido à instabilidade da plagioclase. Embora existam redes cristalinas de feldspato distintas, em geral, estas permitem que o Na^+ difunda mais facilmente do que o K^+ , uma vez que o raio iónico do Na^+ é semelhante ao do Ca^{2+} , possibilitando que estes se substituam mais facilmente. Contudo, o autor citado não encontrou variações significativas de Al/Si, o que aponta para uma possível inexistência de alterações das fases siliciosas dos feldspatos.

A libertação de álcalis por parte dos feldspatos é um processo bastante lento, por vezes mascarado pela incorporação de álcalis que se encontram na solução de poros do betão em produtos de reação de RAS, se a rocha for reativa e apresentar este tipo de reações, não se registando assim alteração da quantidade de álcalis presentes na solução (Constantiner e Diamond, 2003). A incorporação de álcalis libertados pelos feldspatos dos agregados nestes produtos demonstra que este tema é importante para entender como os agregados podem contribuir para as RAS, especialmente quando são aplicados cimentos com baixos conteúdos em álcalis. Na determinação de álcalis presentes no betão, utiliza-se o óxido de sódio equivalente (Na_2O_{eq}), expresso em % por massa de cimento:

$$(2.6) \quad \%Na_2O_{eq} = \%Na_2O + 0,658 \times \%K_2O$$

O valor 0,658 expresso na equação é utilizado devido à razão entre a massa molar dos dois óxidos.

Os cimentos Portland podem ser classificados tendo em conta os seus conteúdos em álcalis, dividindo-se em três categorias: baixo, médio e alto (ASTM C 150, 2012). Segundo esta norma, um cimento Portland com baixo teor em álcalis deverá apresentar um valor de $\%Na_2O_{eq}$ inferior a 0,60 %. Os cálculos permitem obter uma ideia generalizada da possibilidade de ocorrência de reações. No entanto, ao estabelecer-se um valor máximo para Na_2O_{eq} ignora-se o facto de a alcalinidade do betão também depender da quantidade de cimento utilizada (Ramos, 2013). Desta forma, quando as outras fontes são excluídas, o conteúdo de álcalis no betão depende exclusivamente do teor de álcalis no cimento (A) e do conteúdo de cimento no betão:

$$(2.7) \quad A = C \times a / 100$$

Onde “a” é o teor em álcalis do cimento (percentagem por massa) e “C” o teor em cimento no betão (massa por unidade de volume; Kg/m^3).

Não obstante, o teor em álcalis do cimento não parece ser determinante para o desenvolvimento de reações deste tipo, mas sim a solubilização do agregado sob o ataque dos iões OH^- (Prince e Perami, 1993).

Grattan-Bellew (1994), em diversos estudos realizados em barragens de betão no Canadá, demonstrou que o teor em álcalis no betão seria superior ao estimado para o cimento, concluindo que seria, assim, oriundo dos agregados utilizados. Este autor defende ainda que rochas que contenham micas, minerais de argila, feldspatos e vidro vulcânico poderão ser suscetíveis a trocas iónicas em solução com hidróxido de cálcio. A presença destes minerais aumenta o teor em álcalis da solução intersticial, incrementando a velocidade de reação com agregados, embora seja reconhecido que não libertam facilmente sódio e potássio da sua rede cristalina (Stievenard-Gireaud, 1997; Le Roux, 1991).

Constantiner e Diamond (2003) concluíram que os feldspatos, quando envolvidos por pasta de cimento libertam álcalis para a solução intersticial, apesar de ser um processo lento. De forma a evitar a ocorrência

de reações álcalis-agregado são frequentemente utilizados cimentos com baixo teor de álcalis. A utilização deste tipo de cimentos poderá ajudar a diminuir a intensidade das RAS, embora tal nunca possa, por si só, resolver os problemas da utilização de agregados suscetíveis a álcalis.

2.6.3. Sílica

O tetraedro de sílica e oxigénio é constituído por um catião de sílica (Si^{4+}) rodeado por quatro aniões de oxigénio (O^{2-} ; Deer *et al.*, 2000) que se encontram nos diferentes vértices do tetraedro, formando uma estrutura bastante estável e forte.

As formas de sílica (polimorfos) estáveis à pressão atmosférica (quartzo, tridimite e cristobalite) apresentam os tetraedros de sílica ligados entre si pelos vértices de oxigénio. Cada um destes iões estabelece ligações com dois catiões de sílica, pertencendo, assim, a dois tetraedros distintos (Deer *et al.*, 2000).

As formas amorfas naturais de sílica (opala, vidro vulcânico) possuem iões que se encontram distribuídos numa rede sem estrutura tridimensional ordenada a longa distância. Esta desorganização estrutural leva à existência de lacunas na estrutura, aumentando a sua área específica e incrementando a reatividade em contacto com soluções aquosas (Carman, 1940).

2.6.4. Mecanismo reacional da RAS

Segundo Soares (2014) existem dois possíveis mecanismos para a ocorrência de reações álcalis-sílica (RAS): o modelo topoquímico e o modelo dissolução-precipitação.

De acordo com o modelo topoquímico, as RAS desenvolvem-se apenas num ponto fixo na superfície dos agregados sem que exista necessariamente a passagem para a solução intersticial de espécies reativas provenientes dos mesmos (Soares, 2014).

No modelo de dissolução-precipitação, as RAS desenvolvem-se na solução intersticial após a passagem ao estado iónico das diferentes espécies reativas. Este modelo defende que existem três fases de expansão. Inicialmente esta desenvolve-se a uma taxa constante, sofrendo, numa segunda fase, um incremento, estabilizando-se numa fase terminal (Soares, 2014). Este mecanismo da RAS assenta no controlo do teor de iões alcalinos e de iões cálcio na solução intersticial. A sua formação ocorre em dois tempos, a saber:

- Ataque dos agregados reativos;
- Desenvolvimento de géis expansivos.

Os agregados presentes no betão, tal como referido anteriormente, são atacados por hidróxidos provenientes do hidróxido de cálcio presente, dissolvendo a sílica de diferentes minerais. Esta reage com os iões alcalinos e hidroxilos, originando um gel. De forma a manter a neutralidade do meio, os iões Na^+ e K^+ difundem-se para o interior do agregado ionizado (Soares, 2014).

No entanto, existe uma diferença de potencial químico entre a solução contida no gel e a solução intersticial, que leva a uma maior absorção de água por parte do gel. Tal facto contribui para o aparecimento de esferas de hidratação por atração de água. O processo de absorção provoca a expansão do gel e é controlado pela velocidade de formação dos produtos de reação das RAS e de dissipação do gel. Contudo, este aumento de volume apenas ocorre caso a velocidade de formação dos produtos de hidratação seja superior à velocidade de dissipação do gel no betão, o que, por sua vez, se relaciona com a permeabilidade, viscosidade e porosidade do mesmo.

Este modelo não explica, no entanto, o papel que o catião Ca^{2+} desempenha ao longo de todo o processo.

Devido à quebra das ligações adjacentes aos grupos silanol (Si-OH) ocorre uma distorção na estrutura da sílica. Tal facto permite a formação de novas ligações com catiões Na^+ e K^+ que vão, assim, penetrando na estrutura. A velocidade a que estes são incorporados no interior da estrutura é maior quanto maior for a abertura da mesma e o seu estado de hidratação (Poole, 1992). À medida que o gel expande, por absorção de água, a rede reabre-se permitindo a captação de maior quantidade de iões de Ca^{2+} (de menores dimensões que o ião potássio e semelhante ao ião sódio) que substituirão os catiões Na^+ e K^+ , anteriormente captados. Deste modo, dá-se uma regeneração destes iões, permitindo que a reação progrida (Poole, 1992).

Segundo Soares (2014), um outro modelo reacional das RAS é descrito na literatura. Este modelo defende que a formação do gel sílico-alcalino expansivo pode ocorrer em qualquer parte do betão e não só no contacto com o agregado reativo, como descrito anteriormente.

A fase inicial deste processo corresponde ao ataque da superfície de sílica por um processo topoquímico. O gel que cobre o grão de sílica é relativamente solúvel, difundindo-se na solução intersticial rica em iões de silicato e de cálcio. Numa solução rica em iões alcalinos e hidroxilos, a junção de iões silicato e cálcio leva à precipitação de silicatos de Ca e/ou silicatos de Na e K, isto é, ocorre a formação dos géis e dos produtos cristalizados (Soares, 2014). A natureza destes produtos de reação depende das concentrações locais da solução em sílica, em cálcio e em álcalis. A expansão observada é atribuída à cristalização dos produtos de reação. Este último modelo apresenta algumas contradições, uma vez que nem sempre ocorre cristalização do gel sílico-alcalino.

2.7. Reatividade potencial das rochas graníticas

Os granitos possuem frequentemente cristais de quartzo com rede cristalina deformada e potencialmente instável ou cisalhada, com superfícies específicas elevadas.

Segundo Ramos (2013), em meados dos anos 50 surgiram as primeiras publicações onde se indicava que as reações álcalis-agregado, em rochas portadoras de quartzo, ocorriam devido a defeitos intracristalinos deste mesmo mineral (Brown 1995). Até aí, as características texturais das rochas utilizadas como agregados eram menosprezadas. DeHills e Corvalán (1964) correlacionaram, mais tarde, em rochas graníticas chilenas, o valor do ângulo da extinção ondulante em cristais de quartzo, o grau de deformação nas suas redes e a intensidade de deformação que estes tinham sofrido. Gogte (1973) demonstrou a importância do exame petrográfico em agregados ao concluir que a deformação que o quartzo apresentava estava relacionada com o potencial de reatividade aos álcalis desse mesmo agregado. Segundo este autor, a reatividade aumentaria devido ao incremento das deslocações na rede cristalina do quartzo, em resposta à deformação, o que levaria a um aumento da fragilidade das ligações entre os átomos de silício e de oxigénio (e possível incorporação de OH nas posições de O: enfraquecimento hidráulico). O incremento (multiplicação) de deslocações cria zonas de desorganização estrutural no seio de um grão individual, concorrendo para o desenvolvimento de sub-grãos. Ao microscópio ótico, o fenómeno descreve-se como um grão com diferentes extinções, complementado por subgranulação intragranular (precedendo a formação de mantos de subgranulação intergranular). Mais tarde, estes processos foram definidos como indicadores da potencialidade que um agregado poderia ter para reagir, não sendo utilizado como diagnóstico (West 1991, 1994). O quartzo com intensa extinção ondulante encontra-se muitas vezes associado a quartzo microcristalino resultante de recristalização dinâmica.

As rochas ígneas, grupo onde se inserem os granitos, podem apresentar características de deformação que levem a que se comportem como agregados reativos (Prince *et al*, 2001; Ramos, 2013; Ramos *et al*, 2016).




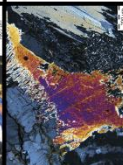
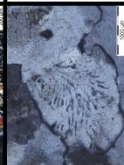

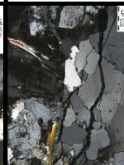


Lindgård *et al.* (2010) classifica este tipo de rocha, juntamente com outras portadoras de quartzo, de reação lenta, uma vez que os agregados graníticos, em certas circunstâncias, reagem com os álcalis causando uma deterioração lenta nas estruturas de betão.

No entanto, não são apenas estas formas de quartzo que poderão provocar a reatividade nestas rochas. Outros silicatos como, mais especificamente, os feldspatos (ortoclase, microclina e albite), as micas e os feldspatóides (nefelina e leucite) podem ser uma fonte de álcalis para as reações álcalis-agregado (Prince *et al.*, 2001).

A vulnerabilidade que uma determinada rocha apresenta à alteração depende da maior ou menor estabilidade dos seus minerais, bem como da textura, da porosidade e do grau de fissuração que a mesma ostenta.

Como já foi referido, é crucial que se identifiquem, através da análise petrográfica, as distintas espécies minerais, bem como o seu grau de deformação, texturas e dimensões dos cristais. Existem ainda algumas características petrográficas dos minerais que podem contribuir para a libertação de álcalis para a solução intersticial do betão, promovendo as reações álcalis-sílica (Tabela 2.4). As mirmequites, quartzo criptocristalino, sub-granulação e extinção ondulante neste mesmo mineral contribuem para um incremento na libertação de sílica. A alteração de micas e feldspatos, sericitização e o tipo de feldspato presente num agregado condicionam a libertação de álcalis.

Tabela 2.4 - Características dos minerais de um agregado que podem contribuir para as RAS (fotos petrográficas em nicóis cruzados)

Tipo	Tipo de Feldspato	Pertite	Sericitização	Alteração de micas e feldspatos	Mirmequite	Fratura	Sub-granulação	Extinção ondulante	Quartzo microcristalino
Input	Libertação de sódio ou potássio	Libertação de álcalis	Libertação de álcalis	Libertação de álcalis	Libertação de sílica e álcalis	Permite o escoamento da solução intersticial	Libertação de sílica	Libertação de sílica	Libertação de sílica
Foto									

2.7.1. Granitos e granitóides de Portugal

Os granitos são rochas bastante comuns no norte e centro de Portugal, o que contribui para a grande utilização de agregados deste tipo de rocha em inúmeras infraestruturas, como pontes e barragens. No entanto, nem todos apresentam as mesmas características e assim, os mesmos graus de deformação.

Na Zona Centro-Ibérica (ZCI) ocorre um volume significativo de rochas graníticas (60-70 % das rochas aflorantes), que correspondem a sucessivos pulsos magmáticos (Dias *et al.*, 2010). Estas rochas são descritas como tendo uma composição variável e diversificada tipologicamente, desde fortemente peraluminosas a ligeiramente metaluminosas (Dias *et al.*, 1998; 2010).

Ferreira *et al.* (1987) classificaram as rochas graníticas baseando-se em características estruturais, petrográficas, mineralógicas, texturais e geoquímicas, de acordo com o seu período de instalação usando a última fase de deformação dúctil do Varisco como referência (D3) juntamente com a mica que prevalece na rocha (granitos biotíticos, de duas micas e moscovíticos). Os granitos instalaram-se predominantemente durante a após D3. Assim, é usual serem descritos como sin-tectónicos, tardi-tectónicos e pós-tectónicos

em termos de período de instalação (Dias, 2001; Dias *et al.*, 2010). Desta forma, os granitóides podem dividir-se em quatro grupos distintos:

- Granitóides sin-D3 - granitos e granodioritos biotíticos, fracos a moderadamente peraluminoso e granitos de duas micas fortemente peraluminosos (312-321 Ma);
- Granitóides tardi-D3 - granitos e granodioritos biotíticos, fracos a moderadamente peraluminosos, que por vezes ocorrem associados a rochas básicas ou intermédias (305-312 Ma);
- Granitóides tardi- a pós-D3 – leucogranitos de duas micas e granitos biotíticos fracamente peraluminosos (300 Ma);
- Granitóides pós-D3 – granitos biotíticos ligeiramente metaluminosos (290–299 Ma).

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho compreendeu a execução de diferentes ensaios laboratoriais (RILEM AAR-8, Gel Pat Test e ataque básico a feldspatos), precedidos pela análise petrográfica (microscopia ótica) e métodos complementares, como a microscopia eletrónica de varrimento com análise química qualitativa por espectroscopia de raios X (MEV/EDS) e a microsonda eletrónica. Foi ainda realizada análise de imagem.

As amostras foram seleccionadas de forma a obter um grupo representativo da realidade vigente no território Português

3.1. Materiais

No presente trabalho foram seleccionadas sete amostras de granito, anteriormente ensaiadas em laboratório para avaliação da sua reatividade potencial aos álcalis. Teve como objetivo determinar a libertação de Na^+ e K^+ em soluções de elevado pH, procurando desta forma simular as condições que se verificam no betão.

Os agregados foram fornecidos ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC na sequência do projeto de investigação IMPROVE financiado pela FCT, liderado pelo LNEC e com participação das Universidades do Porto, Lisboa e Évora, onde se estudou a reatividade potencial de agregados graníticos através de ensaios petrográficos e de expansão de provetes de argamassa e de betão (Ramos, 2013). Estes agregados provieram de pedreiras cujos materiais foram ou podem vir a ser utilizados em grandes construções de betão em Portugal. A localização aproximada das referidas pedreiras encontra-se representada na Figura 3.1, referente à zona norte e centro de Portugal, na carta geológica à escala 1:500 000.

De acordo com a nomenclatura estabelecida pelo LNEC, as amostras escolhidas foram designadas por GR2, GR13, GR18, GR21, GR23, GR24 e GR29.

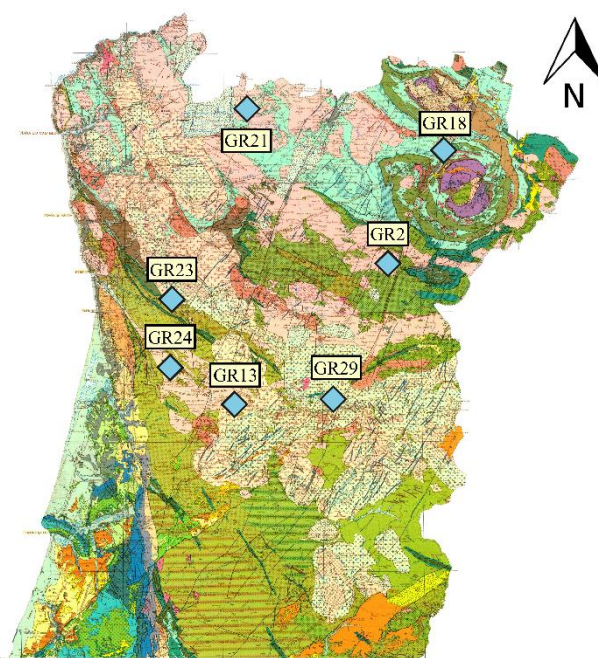


Figura 3.1 – Indicação aproximada dos locais de amostragem dos agregados estudados (sem escala)

Atendendo ao facto de que nos lotes preparados nas pedreiras há sempre alguma mistura de granito são (sem indícios de alteração) e de granito alterado, mostrou-se de interesse avaliar a libertação de álcalis para diferentes graus de alteração da rocha. Assim, para cada uma das sete amostras de granito foram analisadas duas frações, correspondentes a granito sem alteração e a granito com alteração. Em alguns casos analisou-se uma terceira fração, o granito de coloração rosa. De acordo com a nomenclatura estabelecida pelo LNEC, as amostras escolhidas foram designadas por GR2, GR13, GR18, GR21, GR23, GR24 e GR29, acrescentando-se um “N” no caso da fração sã, um “A” para a alterada e um “V” à fração de coloração rosa (Tabela 3.1). Estes agregados foram escolhidos entre os que mostraram ser potencialmente reativos aos álcalis nos ensaios de laboratório realizados anteriormente, no âmbito do projeto de investigação (IMPROVE).

Foram separadas manualmente partículas representativas das diferentes frações com o intuito de se fazerem lâminas delgadas e algumas polidas. As amostras foram cortadas numa serra diamantada, obtendo-se

taliscas de dimensões aproximadas 30x20x15 mm. Estas foram impregnadas sob vácuo com resina epoxídica de forma a consolidar todos os componentes da rocha. As taliscas impregnadas foram em seguida coladas em lâminas de vidro e posteriormente cortadas com serra de precisão de forma a reduzir a sua espessura para cerca de 1 mm. A esse processo seguiram-se várias fases de desgaste e polimento com pastas de diamante sucessivamente de 14, 6, 3 e 1 μm até se obter uma espessura de 30 μm (Grover, 1968).

Tabela 3.1 - Lista de agregados utilizados no estudo, distinguindo as diferentes frações analisadas.

Fração Agregado	Sã (N)	Alterada (A)	Feldspatos Rosados (V)
GR2	GR2-N	GR2-A	—
GR13	GR13-N	GR13-A	—
GR18	GR18-N	GR18-A	GR18-V
GR21	GR21-N	GR21-A	GR21-V
GR23	GR23-N	GR23-A	—
GR24	GR24-N	GR24-A	—
GR29	GR29-N	GR29-A	—

Para o ensaio AAR-8 foi necessário obter 200 g de cada fração com granulometrias inferiores a 150 μm . Desta forma, separaram-se as partículas das diferentes frações, que foram, posteriormente, processadas no isogranulador – este aparelho consiste num moinho de rolos de aço endurecido onde a amostra é processada com o intuito de diminuir a sua granulometria e de a tornar adequada para o moinho de ágata. Neste último, procedeu-se à moagem por 15-20 minutos de cada amostra separadamente. Entre cada passagem de material no moinho procedia-se à limpeza do equipamento de forma a evitar contaminações. Após a moagem, todo o material de cada fração foi passado no peneiro de malha 150 μm , conseguindo-se assim a granulometria desejada. Finalmente, com uma balança de resolução 0,001 g, procedeu-se à pesagem de 200 g de cada fração.

De forma a entender como as soluções ricas em álcalis, com pH elevado, poderiam interferir com os feldspatos de agregados graníticos colocaram-se cristais de grandes dimensões (decimétricos) numa solução de hidróxido de sódio de concentração conhecida. Este ensaio teve como base estudos realizados por Ben Haha (2006), para observação de indícios de dissolução nos feldspatos.

Os cristais de feldspato foram extraídos, com recurso a uma serra de precisão, de duas lajes de granito porfiróide, uma de rocha sã e outra com indícios de alteração. Os feldspatos foram previamente impregnados em resina e polidos, antes do início do ensaio, a fim de se criar uma superfície fresca e com o mínimo de rugosidades.

Para verificar a existência de reações entre os cristais e a solução procedeu-se ao seu estudo em amostra de mão e com o auxílio de uma lupa binocular, no início e após a realização do ensaio, tendo-se ainda realizado o registo fotográfico dos mesmos. Foram também realizadas lâminas delgadas das duas lajes graníticas a fim de estudar os feldspatos ao microscópio ótico.

As superfícies polidas foram observadas à lupa binocular e ao microscópio eletrónico de varrimento (MEV) com a realização de microanálise de raios X (EDS) para determinar a variação da composição dos feldspatos em resultado da exposição a uma solução fortemente alcalina.

Para o ensaio Gel Pat Test utilizaram-se prismas de betão de ensaios de expansão (AAR-3 ou AAR-4) realizados no projeto de investigação acima referido. Os prismas foram serrados e polidos de forma a criar uma superfície fresca, sem rugosidades.

3.2. Métodos

3.2.1. Microscopia ótica – análise petrográfica

A microscopia ótica é uma técnica que possibilita um estudo dos materiais, nomeadamente das rochas, através da observação de texturas e identificação das composições mineralógicas que não são visíveis a olho nú.

Neste trabalho foi realizada a análise petrográfica utilizando-se um microscópio OLYMPUS BX60F5 em lâminas delgadas produzidas conforme referido anteriormente. Esta técnica foi empregue com o objetivo de identificar possíveis texturas e minerais que possam contribuir para a ocorrência de RAS no granito (RILEM AAR-0; Nixon e Sims, 2016).

Para identificação do tipo de plagioclase presente nas amostras foi aplicado o método da extinção simétrica (Kerr, 1959), que consiste no cálculo da diferença entre os dois ângulos de extinção das maclas deste mineral, o que permite, com o auxílio do ábaco, determinar a percentagem anortite - albite.

As características que indicam a reatividade de um agregado estão associadas ao teor de sílica reativa e diferem entre países, existindo normas nacionais específicas. Portugal, à semelhança da Dinamarca, França e Alemanha, considera que a existência de mais de 2 % de espécies reativas permite classificar um agregado como potencialmente reativo (LNEC E 461, 2007; Soares, 2014). No entanto, em outros países, o valor desta percentagem é superior. A diferença de abordagem, nos diferentes países, relativamente à definição da reatividade deve-se em parte a diferentes condições climáticas, assim como a diferentes características dos cimentos e tecnologia de betão utilizada (Santos Silva, 2005; Soares, 2014). Tal situação indefinida leva a que seja particularmente difícil o estabelecimento de uma listagem universal de rochas e minerais que permita prever a reatividade de um agregado.

Segundo a recomendação internacional RILEM AAR-0 (Nixon e Sims, 2016) os agregados são classificados da seguinte forma:

- **Classe I** – pouco provável que seja reativo aos álcalis;
- **Classe II** – reatividade aos álcalis incerta;
- **Classe III** – muito provável que seja reativo aos álcalis (agregados com opala ou sílica opalina).

Convém salientar que a análise petrográfica não é, por vezes, suficiente para a classificação de um agregado como potencialmente reativo aos álcalis. Frequentemente torna-se necessário realizar ensaios complementares em especial quando os agregados se enquadram na classe II (Soares, 2014).

3.2.2. Análise de imagem

A análise de imagem consiste num tratamento de fotomicrografias obtidas ao microscópio ótico de polarização através da aplicação de filtros e de pequenas mudanças nas características da imagem. Esta técnica permite detetar padrões, como pequenas variações composicionais e rede de fracturação, entre outras, que não são perceptíveis a olho nu e que podem ser assim quantificadas.

A análise foi realizada com base no registo fotográfico obtido das lâminas delgadas de todas as frações utilizadas no ensaio RILEM AAR-8, através de uma câmara Zeiss Axio acoplada ao microscópio petrográfico. O programa utilizado foi o *free software* ImageJ.

A utilização da análise de imagem teve como objetivo a quantificação de algumas características que permitissem o estabelecimento de classes de graus de alteração das rochas para correlação com os resultados obtidos no ensaio AAR-8, nomeadamente a ocorrência de fraturas e de minerais de argila.

3.2.3. Microscopia eletrónica de varrimento e microanálise de raios X por dispersão de energia (MEV/EDS)

A técnica denominada microscopia eletrónica de varrimento (MEV) consiste na obtenção de imagens de estruturas de dimensão nanométrica através do estudo de um espectro de raios X, emitido por uma amostra sólida, em vácuo, após ser bombardeada por um feixe estável de eletrões.

Os eletrões emitidos pelo feixe (eletrões primários), ao atingirem a superfície da amostra, interagem com os átomos da mesma, ocorrendo a sua dispersão inelástica. Como resultado desta interação, os eletrões de camadas de menor energia poderão ser libertados (eletrões secundários). Estes são pouco energéticos e, por vezes, quando se encontram muito próximos da superfície e possuem energia suficiente, conseguem escapar do material, permitindo obter imagens com forte contraste topográfico (MEV; Potts *et al.*, 1995). Contudo, quando um eletrão secundário se liberta, o átomo a que pertencia fica num estado de energia mais elevado. Assim, eletrões de órbitas superiores tenderão a movimentar-se de forma a reestabelecer o equilíbrio, emitindo raios-X. Estas radiações são detetadas pelo MEV, permitindo realizar análises químicas na amostra (Reed, 1996). Através deste método também é possível obter imagens de menor detalhe, mas que permitem ter uma ideia da massa atómica dos elementos presentes na amostra, aparecendo os mais leves em tom escuro e os mais pesados em tom claro (Reed, 1996).

Se o eletrão primário conseguir alcançar o interior de um átomo, sofre um desvio na sua trajetória devido à força que as cargas positivas do núcleo desta partícula têm sobre ele. Este fenómeno é denominado por força de Coulomb, podendo ser utilizado para obter análises químicas, uma vez que é diretamente proporcional ao número atómico do átomo (Z), permitindo, assim, determinar que elementos se encontram presentes na amostra. Em teoria todos os elementos desde o número atómico 5 (B) ao 92 (U) podem ser identificados, contudo alguns equipamentos não se encontram equipados para elementos leves ($Z < 10$).

O EDS, ou *Energy Dispersive Spectroscopy*, é utilizado muitas vezes acoplado ao MEV e permite determinar a composição química semi-quantitativamente. Este sistema analisa os raios X emitidos pelos átomos, determinando semi-quantitativamente a quantidade de elementos presente na amostra. Os dados obtidos são colocados num gráfico com picos característicos dos diferentes elementos químicos. A abundância relativa de cada um é calculada através da comparação da área de cada um dos picos obtidos (Potts *et al.*, 1995).

Para se utilizarem estes métodos é necessário que as amostras apresentem boa condutividade elétrica superficial, de forma a não danificar as amostras, por isso, é necessário aplicar um revestimento ultrafino dum metal, como Au ou C (Reed, 1996).

No presente trabalho, as observações foram realizadas num MEV de modelo JEOL-JSM 6400 no modo de eletrões retrodifundidos e em simultâneo a análise química através de um sistema EDS Inca X-Sight da marca Oxford Instruments.

A utilização de MEV teve por finalidade observar as variações morfológicas da superfície dos cristais de feldspato em resultado do ataque por uma solução alcalina. A realização de microanálise pretendeu complementar a identificação, através do EDS, do tipo de plagioclase obtido por microscopia ótica. Foi ainda realizada análise MEV/EDS nos provetes submetidos ao Gel Pat Test para verificar possíveis modificações da pasta de cimento e estudar os produtos de reação que possam ter-se formado durante o ensaio.

3.2.4. Microsonda eletrónica (EPMA)

A microsonda eletrónica (EPMA - Electron Probe Microanalyzer) é capaz de determinar a composição elementar de áreas de dimensões nanométricas e a distribuição das concentrações elementares destas, através da irradiação de uma amostra por um feixe de eletrões altamente concentrado, medindo a intensidade do espectro de raios-X que é gerado como resposta, tal como descrito para o MEV (Potts *et al.*, 1995; Goodge, 2016). Estas emissões são gravadas, com bastante precisão, em comprimentos de onda específicos em 4-5 WDS - *Wavelength dispersive spectrometer*. Este método permite a análise química de diversos elementos em simultâneo através do ajustamento dos diferentes WDS.

O sistema permite uma análise com maior precisão e maior sensibilidade do que técnicas com microscópios eletrónicos de varrimento (MEV) equipados com EDS. As análises quantitativas deste método são obtidas através de uma comparação com padrões pré-existentes. Os resultados podem ser utilizados de forma a identificar uma fase mineral, convertendo os dados da abundância de cada elemento numa fórmula química mineral.

Neste método, tal como foi descrito para o MEV e EDS, é necessário cobrir as amostras com uma fina película de Au ou C (Reed, 1996).

As análises químicas pontuais (quantitativas e qualitativas) do ensaio Gel Pat Test e dos cristais de feldspato sujeitos a ataque químico foram realizadas com a microsonda eletrónica JEOL JXA 8200 equipada com quatro espectrómetros WDS, 7 cristais analisadores (TAP, DEE2, LIF, LIFH, PET, PETH e PETJ) e detetores de eletrões secundários e retrodifundidos, para além de um espectrómetro de dispersão de energia (EDS). Estas análises foram realizadas com feixes de diâmetro 5 µm, 25 nA de corrente de emissão, 15 kV de potencial de aceleração e tempos de contagem de 20 s. A rotina de calibração da microsonda recorreu à análise de padrões e de minerais de composição conhecida (Anexo 1). A lâmina de um provete submetido a Gel Pat Test foi também analisada à microsonda eletrónica, utilizando os padrões listados no Anexo 2.

3.2.5. RILEM AAR-8

Diversos estudos realizados em betão, cimento e em amostras de agregados demonstram que alguns agregados ou minerais presentes nestes podem conter quantidades significativas de álcalis. Estes álcalis,

com o tempo, poderão migrar para a solução intersticial do betão. A existência de agregados portadores de álcalis pode ser preocupante, pois poderão contribuir para o aumento do teor total de álcalis no betão.

Vários métodos têm sido sugeridos com o intuito de determinar que agregados poderão libertar mais facilmente os álcalis que possuem. Muitos destes ensaios têm como base a extração com uma solução de hidróxido de cálcio, mas não são considerados adequados para replicar a possível libertação de álcalis no interior do betão. Atualmente existe um projeto de método de ensaio, denominado AAR-8, desenvolvido com o intuito de avaliar o conteúdo alcalino libertado pelos agregados.

O RILEM AAR-8, ou apenas AAR-8, é um método desenvolvido a partir de um primeiro estudo efetuado no Canadá e muitos outros levados a cabo em Espanha, Portugal e França. Através desta técnica pretende-se investigar a forma como os agregados, utilizados no betão, reagem com a solução alcalina de elevado pH.

A realização deste ensaio permite avaliar a contribuição dos agregados no fornecimento de álcalis para o betão, através da determinação da quantidade de iões de sódio (Na^+) e potássio (K^+) libertados por esses mesmos agregados, quando imersos em soluções de KOH e NaOH, respetivamente, simulando a solução intersticial dos poros do betão (Nixon e Sims, 2016). Para acelerar a reação os ensaios são realizados a temperaturas elevadas.

No trabalho que originou este relatório, as amostras utilizadas (100 g de cada fração), após moagem, foram imersas em volumes específicos (400 mL) de soluções de 0,7 M de NaOH (para extração de potássio) e 0,7M de KOH (para extração de sódio), na proporção agregado/solução de 1:4 e mantidas em frascos de polietileno hermeticamente fechados a uma temperatura constante de 38 °C e RH > 95 %, idênticas às aplicadas no ensaio RILEM AAR-3 (Nixon e Sims, 2016).

Os frascos contendo as soluções e os agregados foram agitados manualmente duas vezes por semana, por cerca de 10 segundos, durante todo o período de duração da experiência. Periodicamente (2, 6, 13, 26 e 52 semanas) foi retirada uma amostra de cada solução (10 mL) que, após filtração e acidificação, foi analisada num espectrómetro de absorção atómica para determinar o teor de álcalis libertado.

3.2.6. Gel Pat Test

O Gel Pat Test é um ensaio que permite determinar a suscetibilidade de um agregado ou de uma fase mineral em formar gel sílico-alcalino na presença de uma solução de pH elevado.

O teste foi desenvolvido a partir de um ensaio realizado por Stanton em 1940, tendo este autor demonstrado a formação de gel por parte de agregados contendo opala, em pequenas percentagens, o que era dificilmente detetável ao microscópio petrográfico.

Embora subsistam diferentes normas para a realização deste ensaio é consensual que os seguintes aspetos devam ser respeitados (Lanza *et al.*, 2012):

- Os reagentes das soluções utilizadas devem ser NaOH, KOH e/ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de forma a obter-se a alcalinidade desejada;
- A duração do ensaio depende da temperatura definida;
- A temperatura ambiente não é aconselhável para a realização deste ensaio, sendo necessário uma temperatura mais elevada para desencadear e acelerar a formação de gel.

A temperatura adequada para a realização do ensaio continua a ser alvo de debate por diversos autores, uma vez que se verifica que certas fases podem reagir apenas a temperaturas elevadas (Lanza *et al.*, 2012).

Neste trabalho, utilizou-se o procedimento descrito por Villeneuve (2011) que empregou a metodologia de Bérubé e Fournier (1993), esta última uma adaptação dos estudos iniciais que Stanton realizou em 1940. Os prismas de betão utilizados no ensaio correspondem às amostras dos agregados estudados (GR2, GR13, GR18, GR21, GR23, GR24, GR29) em ensaios de expansão AAR-3 e AA-4, existindo nesses prismas as frações sã e alterada de cada agregado.

Assim, e de acordo com a metodologia estabelecida, submergiram-se as superfícies dos prismas de betão, previamente polidas, numa solução composta exclusivamente por NaOH 1M, a uma temperatura de 38 °C durante 91 dias. Este ensaio foi posteriormente alargado, numa tentativa de que as rochas estudadas, sendo de reação lenta, demonstrassem algum resultado que de outra forma não seria visível. Os produtos de reação formados foram posteriormente analisados ao MEV/EDS.

De acordo com o expectável, pretendia-se que no final do ensaio fosse possível observar indícios de formação de gel, isto é, o crescimento de pequenos pontos de cor branca na superfície dos agregados. Contudo, não sendo evidentes os resultados do ensaio nestas condições, foi decidido alargar o tempo da sua realização em relação ao que se encontrava definido na norma.

3.2.7. Ataque a feldspatos com solução alcalina

O ataque básico a feldspatos é um ensaio empregue para o estudo do comportamento destes minerais em meios ricos em álcalis. Este ensaio foi baseado nos testes realizados por Locati (2010) e consiste na submersão de cristais de feldspato numa solução de hidróxido de sódio, de concentração 1 M, estudo este complementado por uma análise aprofundada por microscopia eletrónica de varrimento na fase final do ensaio. Desta forma, pretende-se entender como progrediu a reação entre os feldspatos e a solução e como o mineral foi quimicamente atacado.

Tal como referido anteriormente, os feldspatos empregues foram previamente individualizados, com a ajuda de uma serra, de lajes de granito porfiróide contendo megacristais decimétricos. As lajes de rocha utilizadas correspondiam a dois graus de alteração de um mesmo tipo de granito, um alterado e outro são, tendo-se separado os respetivos feldspatos para produção das superfícies polidas que foram submetidas ao ataque alcalino. Foram ainda produzidas lâminas delgadas polidas para efetuar a caracterização petrográfica dos feldspatos e definição dos seus graus de alteração.

4. Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos diferentes ensaios e análises realizados no presente estudo.

4.1. Análise química

As análises químicas de rocha total realizadas no Laboratório ActLabs, no Canadá. O cálculo dos elementos maiores foi realizado pelo método *fusion-inductively coupled plasma* (FUS-ICP: *Thermo Jarrel-Ash ENVIRO II* ICP. As análises abrangeram os diferentes agregados estudados através da petrografia e do ensaio AAR-8. Os valores obtidos encontram-se listados no Tabela 4.1.

A análise da Tabela 4.1 permite concluir que, no geral, os agregados mostram valores superiores de potássio relativamente ao sódio, embora os agregados GR21 e GR29 sejam relativamente semelhantes para ambos os álcalis, isto é, 4,05 e 3,63 % de Na₂O e 4,21 e 4,48 % de K₂O, respetivamente.

Tabela 4.1 - Análise química de rocha total dos agregados estudados (valores expressos em %).

	GR2	GR13	GR18	GR21	GR23	GR24	GR29
SiO ₂	72,76	71,64	70,12	74,51	72,66	72,31	72,85
Al ₂ O ₃	14,13	14,73	14,98	14,44	14,04	14,55	14,37
Fe ₂ O ₃	1,58	2,69	2,61	1,06	2,13	1,65	1,70
MnO	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,05
MgO	0,48	0,63	0,69	0,09	0,48	0,38	0,18
CaO	0,57	0,84	0,89	0,73	0,85	0,64	0,62
Na ₂ O	2,81	3,10	3,05	4,05	3,00	2,99	3,63
K ₂ O	4,43	5,01	4,50	4,21	4,96	5,19	4,48
TiO ₂	0,21	0,33	0,31	0,07	0,26	0,26	0,10
P ₂ O ₅	0,33	0,26	0,24	0,55	0,30	0,44	0,30
LOI	1,63	0,97	2,29	0,61	1,05	1,21	0,50
Total	98,98	100,21	100,10	100,35	99,77	99,64	98,76

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores em percentagem de álcalis de cada granito. Este teor de álcalis é expresso no equivalente de Na₂O, que foi calculado a partir do teor em sódio e potássio da Tabela 4.1 (valores obtidos na análise química de rocha total).

Verifica-se, a partir dos dados da Tabela 4.2, que os agregados com maiores teores em álcalis correspondem aos GR21 e GR29, registando-se valores de 6,82 % e 6,58 %, respetivamente.

Tabela 4.2 – Composição em álcalis dos agregados estudados (valores expressos em %).

	GR2	GR13	GR18	GR21	GR23	GR24	GR29
Na ₂ O	2,81	3,10	3,05	4,05	3,00	2,99	3,63
K ₂ O	4,43	5,01	4,50	4,21	4,96	5,19	4,48
Na ₂ O _{eq}	5,72	6,40	6,01	6,82	6,26	6,40	6,58

4.2. Petrografia, análise de imagem e ensaio AAR-8

Atendendo aos objetivos do presente trabalho, a análise petrográfica deu especial ênfase à identificação e caracterização dos minerais potencialmente fornecedores de álcalis, nomeadamente os feldspatos. A análise de imagem foi realizada como um complemento da petrografia, de forma a quantificar a alteração dos feldspatos, tanto sódicos (plagioclases) como potássicos (feldspato-K). Para comparação dos resultados obtidos através deste método utilizou-se o valor do terceiro quartil. O ensaio AAR-8 foi incluído neste capítulo por ter sido realizado sobre as mesmas amostras.

4.2.1. Agregado GR2

O local explorado para produção do agregado GR2 localiza-se numa mancha do granito de Zedes Cabeça Boa Especiarias, descrito na folha 11-C (Torre de Moncorvo), da carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000 (Ferreira da Silva *et al.*, 1989). Este granito é classificado como um granito sin-D3 de grão médio a grosseiro, porfiróide, de duas micas, com orientação preferencial de alguns minerais da sua matriz.

As partículas do agregado GR2 eram constituídas por um granito porfiróide de grão médio a grosseiro, deformado, apresentando diferentes graus de alteração (Figura 4.1). As partículas foram separadas em duas frações tendo em conta os indícios de alteração que apresentavam, sendo uma composta por granito são, designada por GR2-N (Figura 4.1 - A), e outra mostrando indícios de alteração – denominada por GR2-A (Figura 4.1 - B). Nas amostras de granito mais alterado (GR2 - A) os cristais de feldspato apresentavam cor amarelada ou acastanhada, sem brilho, devido à impregnação por óxidos de ferro exsudados da biotite.

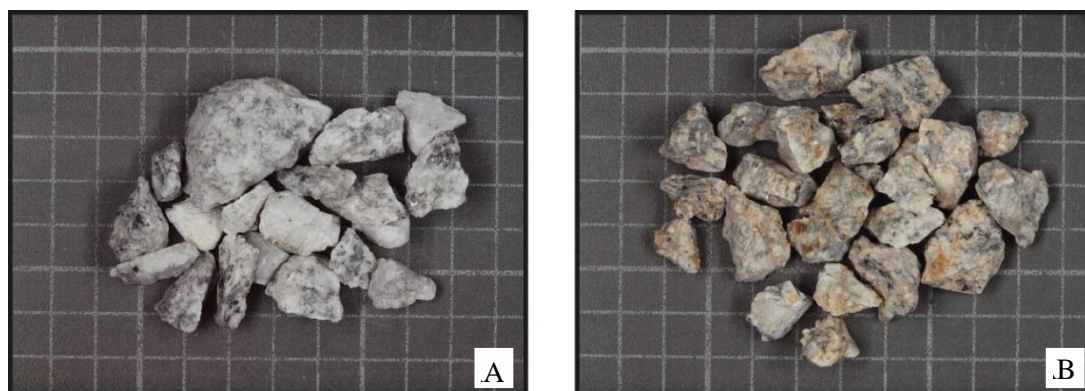


Figura 4.1 - Agregado GR2 (grelha de 1 cm); A-Fração de granito são (GR2-N); B - Fração de granito alterado (GR2-A).

4.2.1.1. Análise Petrográfica

Para a caracterização das partículas de agregado produziram-se várias lâminas delgadas. Esta análise teve como intuito identificar a presença de minerais que pudessem participar nas RAS, em especial os feldspatos.

O estudo do agregado GR2 permitiu concluir que se tratava de um granito de textura hipidiomórfica, cujos cristais, com exceção dos feldspatos, apresentam com frequência bordos suturados. Este granito é constituído essencialmente por quartzo, feldspatos-K, plagioclase, biotite e moscovite, podendo apresentar ainda turmalina, zircão, minerais opacos, rútilo e/ou apatite.

Os feldspatos neste agregado são maioritariamente plagioclase. Esta forma cristais bem desenvolvidos, pertencendo a duas gerações:

- Cristais anédricos bem desenvolvidos de albite, pouco comuns;
- Cristais subédricos de oligoclase com alguma moscovitização, mais acentuada no núcleo, que formam a geração mais abundante.

Relativamente ao feldspato-K, este é predominantemente microclina, ocorrendo em megacristais (< 20mm) pertíticos, com inclusões de cristais orientados de plagioclase e moscovite. Em alguns cristais existem indícios de albitização. A ortoclase ocorre em menor percentagem em relação à microclina.

Verifica-se que a alteração é menos intensa nos feldspatos-K do que nas plagioclases.

Através da análise de imagem determinou-se que os feldspatos-K da fração GR2-N apresentam 10 % da sua área alterada (mediana 7 %; Figura 4.2). As plagioclases destas mesmas partículas de agregado mostram menos de 16 % de superfície alterada (mediana 14 %; Figura 4.2).

Na fração alterada (GR2-A), os cristais de feldspato-K evidenciam superfícies alteradas até 13 % da sua extensão e as plagioclases cerca de 21 % (mediana 11 e 17 %, respetivamente; Figura 4.2).

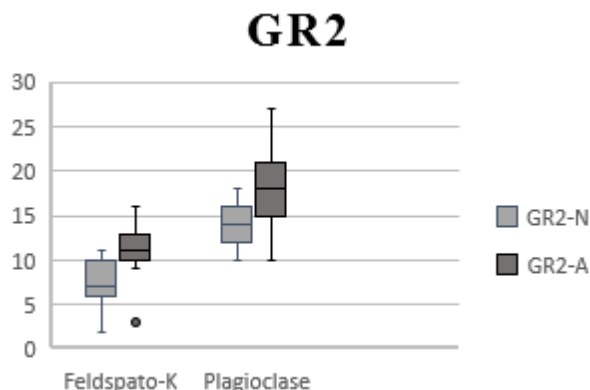


Figura 4.2 – Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR2.

O quartzo, neste agregado, ocorre em cristais anédricos de diferentes dimensões, desde grãos bem desenvolvidos (1 mm) até grãos de pequenas dimensões, por vezes intersticiais, originados por subgranulação e recrystalização. Os cristais apresentam limites serrilhados a suturados, extinção ondulante e subgranulação, adquirindo em certas áreas uma orientação preferencial.

O granito GR2 continha cristais de biotite, de clorite e de moscovite, sendo esta última a mica mais frequente. Os cristais de biotite apresentam-se subédricos, frequentemente curvados e alongados e encontram-se parcialmente alterados para clorite. A moscovite ocorre, como mineral primário, associada à biotite ou substituindo este mineral. A geração de moscovite mais tardia é predominante nos feldspatos e apresenta inclusões de minerais opacos junto aos seus planos de clivagem. A moscovite mostra sinais de deformação, como pequenos dobramentos denominados “kink folds”.

Na rocha observam-se microfissuras intra- e inter-cristalinas frequentemente preenchidas por moscovite microcristalina.

Na fração com grau de alteração superior (GR2-A), que também se mostra mais deformada, o quartzo de pequenas dimensões é mais frequente, existindo também uma cominuição mais intensa de cristais. Os feldspatos-K apresentam extinção ondulante e, nas orlas dos megacristais, é usual a ocorrência de moscovite e quartzo de pequenas dimensões. O grau de alteração das plagioclases e dos feldspatos apresenta-se maior na amostra GR2-A do que na fração normal (GR2-N). Saliente-se que em ambas as frações, GR2-A e GR2-N, as plagioclases evidenciam um maior grau de incidência de alteração do que os feldspatos-K.

Na Figura 4.3 apresentam-se os principais aspetos de alteração da rocha. As imagens obtidas por tratamento de imagem das fotomicrografias realizadas ao microscópio ótico realçam a alteração intensa da plagioclase, sendo esta em geral mais marcada no núcleo dos minerais.

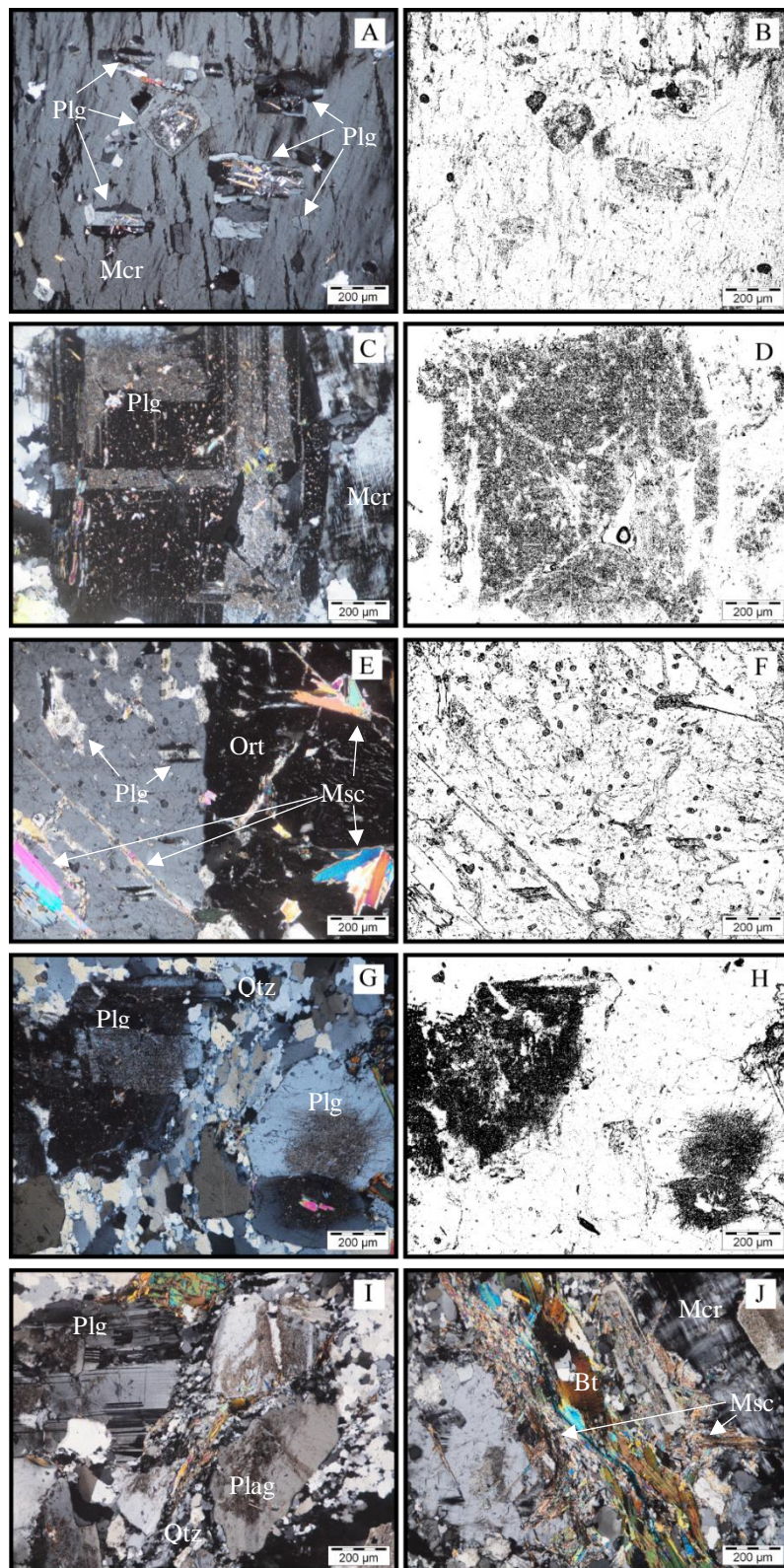


Figura 4.3 – A) Microclina com inclusões de plagioclase (Fração GR2-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração mais intensa da plagioclase; C) Cristal de plagioclase junto a outro de microclina (Fração GR2-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração mais intensa na plagioclase; E) Megacristal de ortóclase com inclusões de plagioclase e moscovite orientada (Fração GR2-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração da ortóclase; G) Cristais de plagioclase separados por um corredor de quartzo subgranulado (Fração GR2-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Subgranulação intensa de cristais de quartzo e moscovite entre dois cristais de plagioclase (Fração GR2-A); J) Cristais de biotite curvados e alongados e moscovite tardia de pequenas dimensões ao longo da fratura (Fração GR2-A); (fotomicrografias em NX).

4.2.1.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio RILEM AAR-8, a seguir denominado por AAR-8, realizado com as duas frações do agregado GR2 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.4.

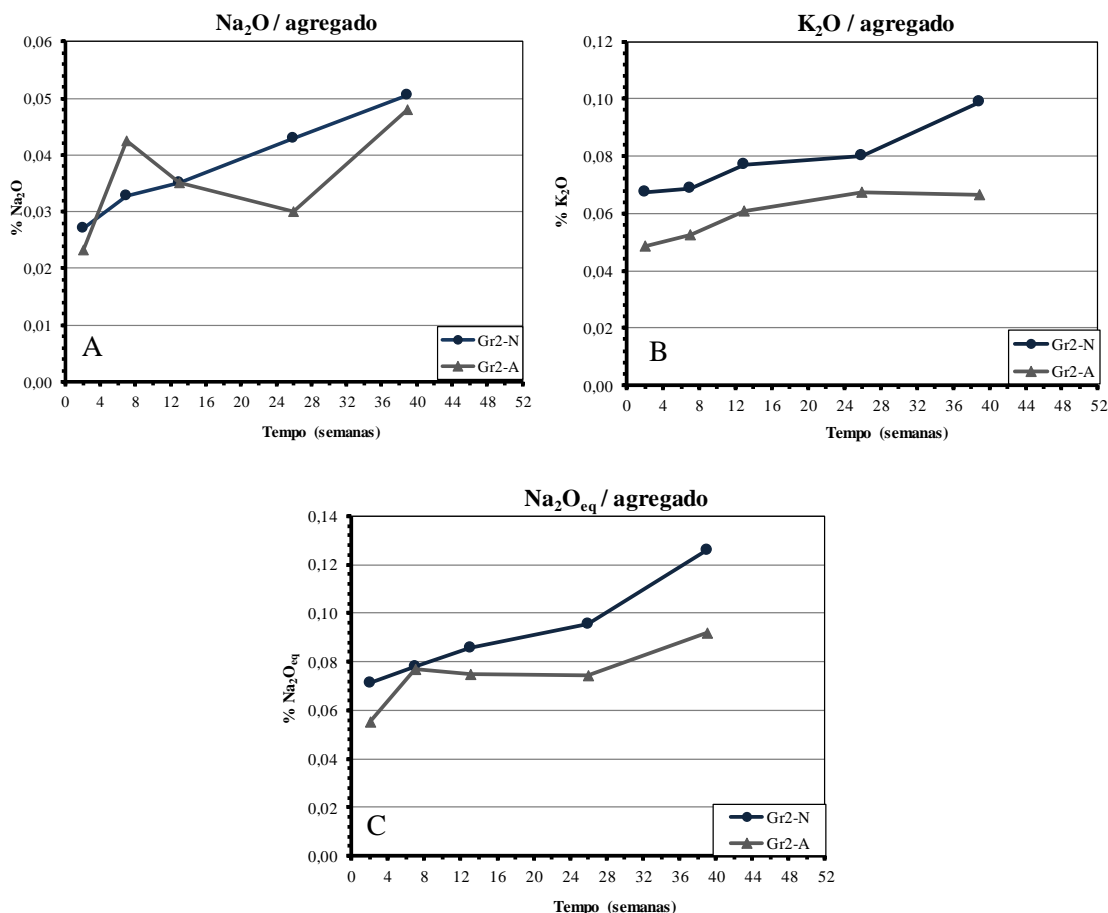


Figura 4.4 – Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR2; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR2; Gráfico C - Libertação de Na₂O_{eq} das duas frações do agregado GR2

Pela análise do gráfico A da Figura 4.4 conclui-se que a libertação de sódio para a solução ocorreu de forma distinta dependendo da fração em causa. Na fração GR2-A, constituída por partículas de granito alterado, o aumento da libertação deste álcali foi bastante acentuado até à sétima semana, a partir da qual sofreu um decréscimo acentuado. Esta diminuição do sódio em solução, demonstrada pelo gráfico, traduziu-se numa inferior libertação de Na⁺ pelas partículas relativamente à quantidade de sódio que foi incorporada nos compostos que precipitaram. Após a quarta amostragem, a libertação de sódio adotou de novo uma taxa positiva que se manteve até ao final do ensaio, aumentando também a concentração do mesmo álcali em solução. Quanto à fração GR2-N, constituída por partículas de granito são, a libertação de sódio apresentou um crescimento contínuo, expressa no referido gráfico por um segmento de reta com declive positivo. Os valores obtidos por GR2-N são superiores aos registados por GR2-A, à exceção do intervalo compreendido entre a quarta e a décima-terceira semanas. Isto pode ser explicado pelo facto das partículas da fração alterada apresentarem fortes indícios de fracturação que poderá ter permitido o acesso de fluidos ao interior das mesmas, permitindo a lixiviação dos álcalis. Salienta-se que as plagioclases presentes em GR2-A ostentavam maiores sinais de alteração, o que se traduziria em menores quantidades de sódio disponíveis nestes minerais, levando a que a libertação deste elemento fosse superada pela precipitação de compostos na amostragem seguinte.

Relativamente à libertação de potássio (Figura 4.4 - Gráfico B), as duas frações mostraram um comportamento semelhante, registando-se um aumento da taxa de libertação de K, entre a sétima e a décima terceira semanas, quando a fração GR2-A estabilizou. No entanto, é de referir que a fração GR2-N foi aquela que, no decorrer de todo o ensaio, alcançou as maiores percentagens de libertação de potássio.

Por definição, Na_2O_{eq} é a percentagem em massa de Na_2O que se libertaria das partículas de agregado correspondente à ponderada de acordo com a equação anteriormente apresentada soma da percentagem em massa de Na_2O e de K_2O , este último expresso em Na_2O , libertados pelas mesmas.

A análise do gráfico relativo a este parâmetro (Figura 4.4 - Gráfico C) permite concluir que a fração GR2-N apresentou um comportamento semelhante ao descrito para o potássio, enquanto a fração GR2-A seguiu o comportamento descrito anteriormente para o sódio. A fração constituída por granito são (GR2-N) foi a que libertou maiores quantidades de álcalis, uma vez que, em todos os gráficos, apresentava valores mais elevados. Os feldspatos da fração GR2-A mostravam indícios de alteração mais proeminentes do que os observados em GR2-N, o que, tal como descrito anteriormente, levou a que existissem menores quantidades de álcalis ainda incorporados nestes minerais disponíveis para a lixiviação durante o ensaio.

Os valores de Na_2O_{eq} serão apresentados nos restantes agregados estudados, mas a análise desses valores segue a tendência verificada para a evolução dos teores de Na_2O e K_2O referentes a cada agregado.

4.2.2. Agregado GR13

A exploração do agregado GR13 localiza-se numa mancha do granito de Souto Escuro na Zona Centro Ibérica. Este granito encontra-se cartografado na folha 17-A; Viseu da Carta Geológica de Portugal, 1964, à escala 1:50.000 (Godinho *et al.*, 2010).

O agregado GR13 era composto por granito sin-D3 de grão médio a grosseiro, com predomínio de quartzo, feldspato e biotite (Figura 4.5).

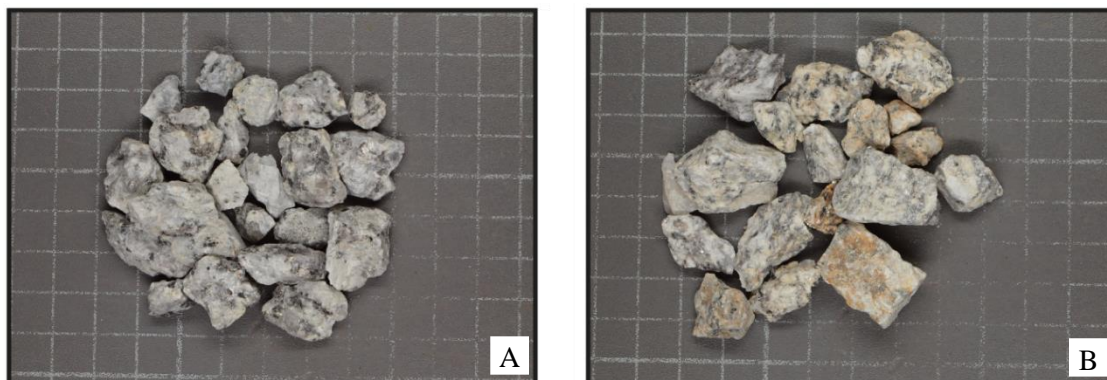


Figura 4.5 - Agregado GR13 (grelha de 1 cm); A-Fração de granito são (GR13-N); B - Fração de granito alterado (GR13-A).

4.2.2.1. Análise petrográfica

O agregado GR13 apresenta, microscopicamente, uma textura hipidiomórfica sendo constituído essencialmente por quartzo, feldspato-K, plagioclase, biotite, moscovite e clorite. Ocorre ainda, apatite, esfena, zircão e minerais opacos. Os diferentes cristais que constituem este agregado não exibem uma orientação preferencial, assumindo assim uma textura isotrópica. Contudo, observam-se domínios de deformação frágil, definindo corredores onde os cristais mostram indícios de cataclase.

O feldspato-K presente na amostra é maioritariamente a microclina, embora também exista, em menor percentagem, ortoclase. Estes minerais apresentam-se em cristais bem desenvolvidos, sendo que a microclina ostenta uma textura menos pertítica, com inclusões de plagioclase, moscovite, quartzo e biotite, e estão alterados por caulínização. Alguns cristais exibem indícios de albitização e/ou subgranulação.

Os cristais de plagioclase apresentam-se subédricos, com algum zonamento e alteração mais intensa no núcleo. As maclas polissintéticas, características deste mineral, mostram-se largas e pouco nítidas, podendo ocorrer conjuntamente com a de Carlsbad. Os cristais de maiores dimensões encontram-se envolvidos por bandas microcristalinas de feldspato. A composição da plagioclase é determinada com base na medição do ângulo de extinção, tendo-se concluído que se trata de oligoclase. Observam-se mirmequites.

Através da análise de imagem procedeu-se à quantificação dos feldspatos das distintas frações. Os cristais de plagioclase de GR13-A exibem áreas até 44 % com indícios de alteração e os feldspatos-K até 27,5 % (mediana 42 e 25 % respetivamente; Figura 4.6). Estes minerais, na fração GR13-N ocorrem com valores inferiores a 24 % de superfície alterada, enquanto as plagioclases apresentam até 40 % (mediana 21 e 37 % respetivamente, Figura 4.6).

No agregado GR13, o quartzo aparece sob a forma de cristais de diversas dimensões com formas anédricas, por vezes com bordos suturados e, mais raramente, serrilhados. É usual apresentarem extinção ondulante e subgranulação, alguns com indícios de estiramento.

Os cristais de biotite mostram-se anédricos a subédricos, lamelares, com bordos corroídos. Apresentam alteração para clorite, maioritariamente ao longo dos planos de clivagem.

A moscovite encontrava-se associada à biotite, contudo ocorre em menor percentagem que esta última. Alguns cristais desta mica mostram sinais de deformação, apresentando um ligeiro dobramento e texturas simpléticas. É frequente a existência de continuidade ótica entre a biotite, a clorite e a moscovite.

As partículas do agregado GR13 mostram zonas catacladas com algumas fraturas, por vezes preenchidas por óxidos de ferro, quartzo e moscovite.

Na fração mais alterada, e também mais deformada, é possível encontrar quartzo microcristalino nos contactos entre os restantes cristais. A alteração das plagioclases e dos feldspatos-K é bastante intensa. A catáclase é intensa em alguns sectores do granito (Figura 4.7).

4.2.2.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 para as duas frações do granito GR13 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.8.

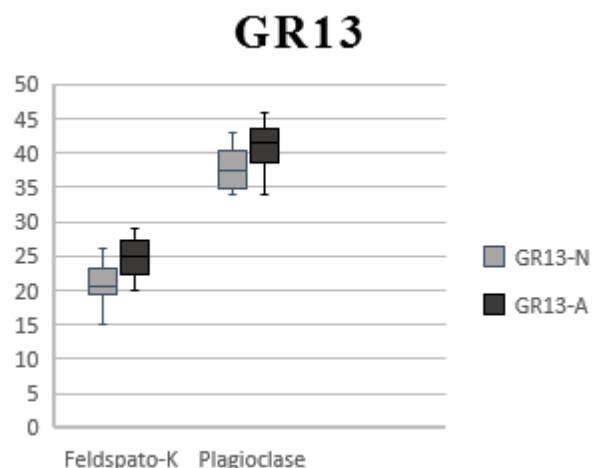


Figura 4.6 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR13.

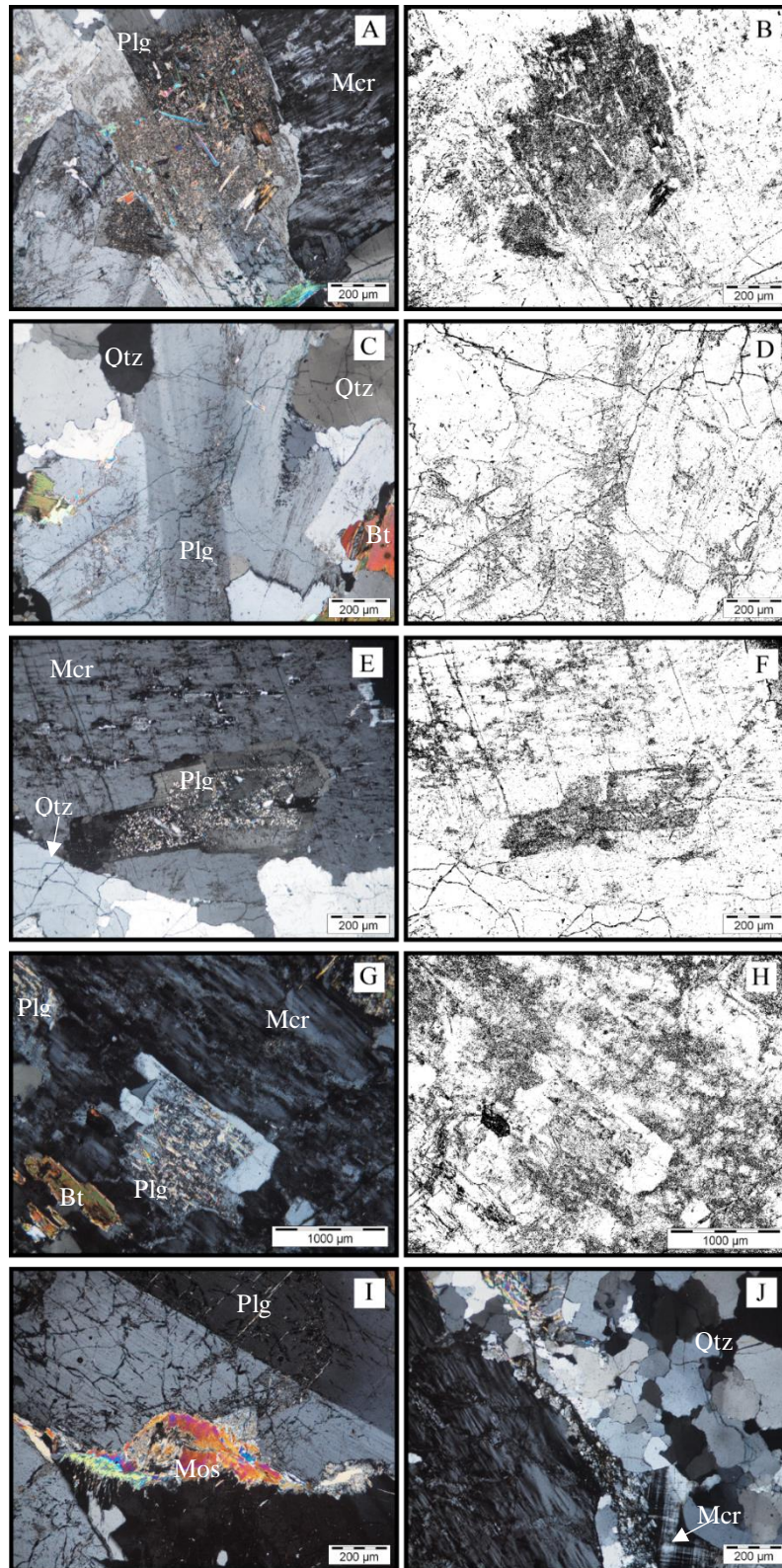


Figura 4.7 – A) Cristal de plagioclase junto a de um outro de microclina, ambos com indícios de alteração (Fração GR13-A; B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de plagioclase com maclas pouco nítidas (Fração GR13-N); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais e a fraturação; E) Cristal de plagioclase em megacristal de microclina (Fração GR13-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de biotite e de plagioclase em microclina (Fração GR13-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a forte alteração dos feldspatos; I) Moscovite anédrica com franjas simplectíticas entre cristais de maiores dimensões (Fração GR13-N); J) Catáclase de cristais de quartzo mais intensa (Fração GR13-A) (fotomicrografias em

No gráfico A da Figura 4.8 é possível constatar que as duas frações do agregado GR13, a composta por partículas de granito são e a de rocha alterada, apresentavam um comportamento geral de libertação de sódio semelhante. Nas primeiras amostragens verificavam-se algumas flutuações, sendo a GR13-N a que apresentava maiores amplitudes. Contudo, após a décima terceira semana, ambas as frações experimentavam taxas de libertação de sódio positivas, que se mantinham até ao final do ensaio

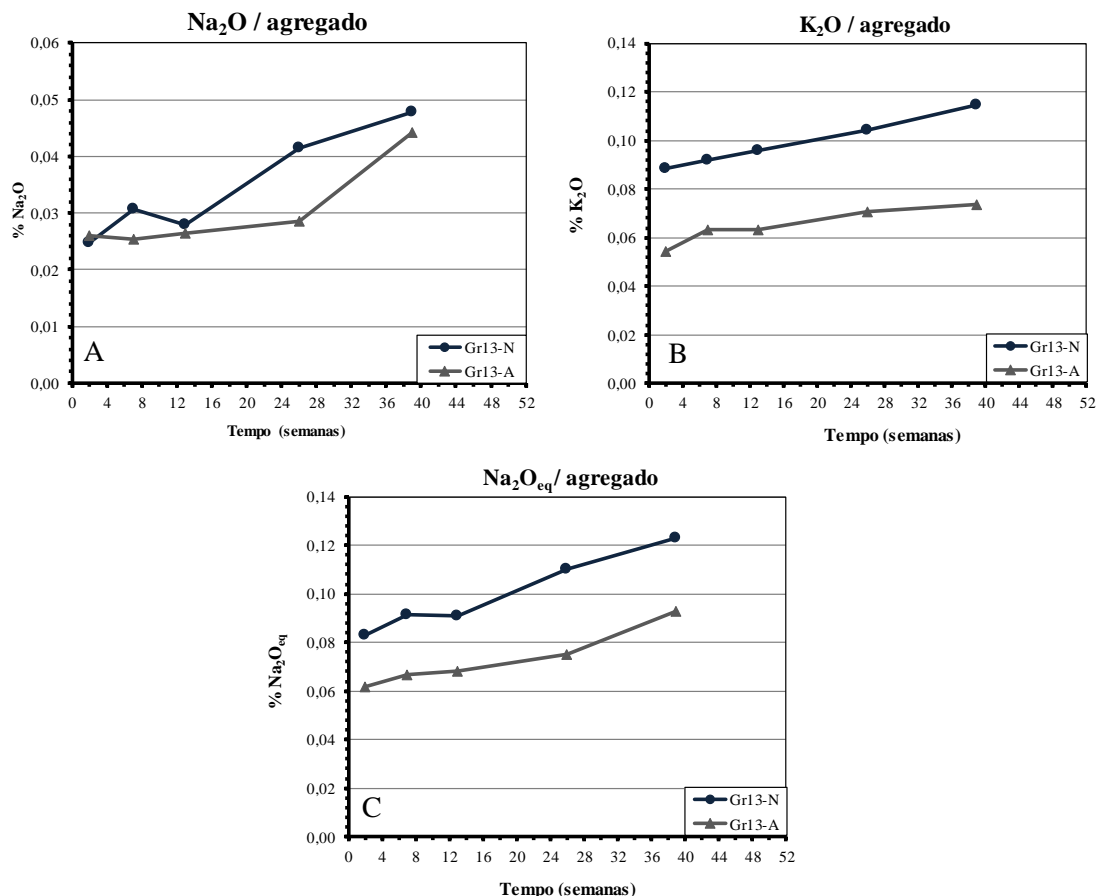


Figura 4.8 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR13; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR13; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das duas frações do agregado GR13.

Do gráfico B da Figura 4.8, relativamente à libertação de potássio para a solução, pode concluir-se que as duas frações (GR13-A e GR13-N) descrevem semirretas com declives positivos, terminando a fração N com cerca de 0,118 % de potássio e a GR13-A com 0,075 %.

O comportamento observado para as duas frações do agregado GR13 relativamente à libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, expressa no gráfico C da Figura 4.8, é semelhante. Em geral, a fração alterada mostrava menores valores de libertação de sódio que os registados para a fração GR13-N uma vez que as suas plagioclases possuíam menores quantidades desses álcalis devido à alteração, tal como descrito anteriormente para as amostras do agregado GR2.

4.2.3. Agregado GR18

As partículas do agregado GR18 são provenientes de uma área onde se encontra presente o granito da Serra de Bornes e o granito de Pombares. Estes encontram-se cartografados na carta geológica 7-D, Macedo de Cavaleiros, à escala 1:50 000 (Pereira, *et al.* 1998).

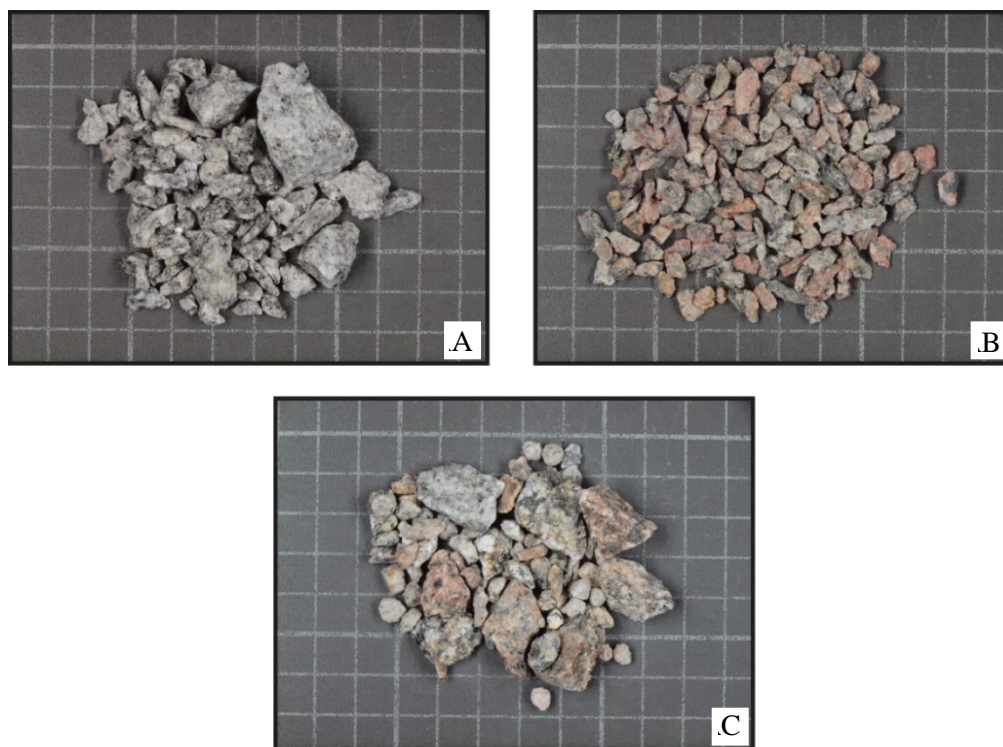


Figura 4.9 - Agregado GR18 (grelha de 1 cm); A) Fração de granito são (GR18-N); B) Fração com feldspatos avermelhados (GR18-V); C) Fração de granito alterado (GR18-A).

As partículas deste agregado são constituídas por um granito sin-D3, porfiróide, de grão médio de duas micas com megacristais de feldspato, apresentando diferentes graus de alteração (Figura 4.9).

Tendo em conta os índices de alteração que apresentavam, as partículas foram separadas em três frações: uma composta por granito são, designada por GR18-N (Figura 4.9 - A), uma outra cujos feldspatos apresentavam coloração avermelhada devido à presença de óxidos de ferro, designada GR18-V (Figura 4.9 - B) e uma última exibindo indícios de alteração – denominada por GR18-A (Figura 4.9 - C).

4.2.3.1. Análise petrográfica

O granito GR18 apresenta-se composto essencialmente por quartzo, feldspato, biotite e moscovite, sendo também possível nele encontrar cristais de apatite, zircão e minerais opacos. Observam-se dois tipos de feldspatos-K, ortóclase e microclina, sendo o primeiro bastante comum na fração alterada, designada por GR18-A (Figura 4.9 - C) e o segundo nas partículas sãs, da fração GR18-N (Figura 4.9 - A). Na fração composta por feldspatos-K avermelhados, denominada por GR18-V (Figura 4.9 - B), estes são maioritariamente ortóclase e apresentam sinais de argilização em todos os fragmentos. A microclina possui textura poiquilítica com diversas inclusões de plagioclase, biotite e apatite, por vezes com indícios de albitização. Na fração sã do agregado (GR18-N), ao redor dos cristais mais desenvolvidos de ortóclase, ocorre plagioclase. Os feldspatos presentes nas partículas alteradas (GR18-A) apresentam-se pouco pertíticos, mas contendo inclusões de biotite e moscovite.

A plagioclase mais frequente neste agregado é a oligoclase, encontrando-se sob a forma de cristais anédricos a subéricos que, na fração sã (GR18-N), apresentam zonamento mais intenso. Os cristais exibem moscovite microcristalina e alguma calcite como produto de alteração, a qual evidencia maior intensidade do que a observada nos feldspatos-K. Por vezes registam-se mirmequites. Foram observadas duas gerações de plagioclase, a saber:

- Cristais mais desenvolvidos, que se encontram alterados, compostos por albite;

- Cristais de oligoclase, de dimensões e grau de alteração inferiores.

A análise de imagem permitiu a quantificação da alteração observada nos cristais de feldspato.

Nas partículas da fração GR18-N os cristais de feldspatos-K evidenciam áreas até 22 % alteradas, enquanto em GR18-V ocorre maior número de indícios, chegando até 28 % da área e em GR18-A a 26 % (mediana 20, 25 e 23 % respetivamente; Figura 4.10).

Os cristais de plagioclase desta última fração apresentam-se alterados, com valores até 55% da sua área alterada; em GR18-V os valores não diferem muito, atingindo 58 %, ao passo que a fração GR18-N apresenta valores até 41 % (mediana 53, 57 e 36 % respetivamente; Figura 4.10).

O quartzo presente nas três frações do agregado apresenta bandas de deformação de diferentes granularidades. Este mineral revela com frequência extinção ondulante, cristais estirados e subgranulação. O quartzo tectonizado ocorre em torno de grãos deformados de maior dimensão.

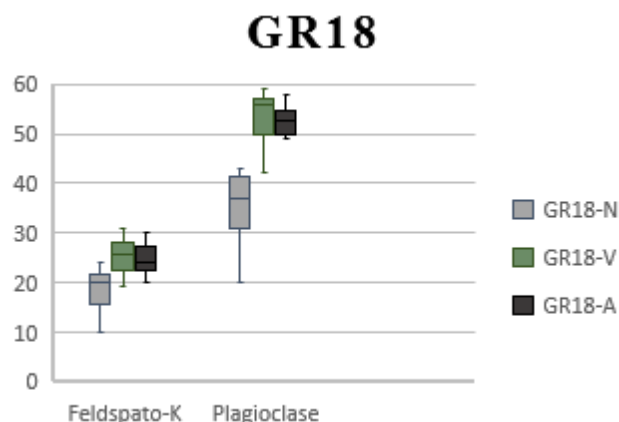


Figura 4.10 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR18.

A biotite ocorre em placas bem desenvolvidas e com hábito subédrico, por vezes alterada para clorite.

A moscovite apresenta-se em cristais anédricos a subédricos, apresentando, por vezes, “kink folds”. É comum a observação de franjas simpletíticas nos seus cristais e extinção ondulante. Os cristais de pequenas dimensões preenchem pequenas fraturas ou substituem a biotite ao longo dos seus planos de clivagem.

Existem microfissuras intra- e inter-cristalinas que atravessam, frequentemente, os principais minerais, por vezes preenchidas por quartzo microcristalino e/ou moscovite.

Neste granito os minerais evidenciam orientação preferencial fraca, definida essencialmente pelos filossilicatos.

Na fração alterada os cristais de quartzo apresentam menores dimensões e os feldspatos maior grau de alteração; porém, o núcleo, à semelhança das outras frações, é o local onde esta se mostra mais intensa.

De todas as frações, a GR18-V é aquela que exhibe maiores indícios de alteração e deformação. A extinção ondulante e subgranulação observada nos cristais de quartzo é mais intensa e as fraturas estão preenchidas, para além dos minerais referidos anteriormente, por óxidos de ferro. Ao longo dos planos de clivagem dos cristais de plagioclase existem cristais de moscovite resultantes da intensa alteração. Observam-se ainda corredores de deformação, onde os cristais de micas e de quartzo mostram cominuição. Esta fração apresenta frequentemente mirmequites. As biotites estão parcialmente alteradas para clorite.

Os principais aspetos de alteração e deformação da rocha apresentam-se na Figura 4.11.

4.2.3.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 realizado para as três frações do granito GR18 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.12.

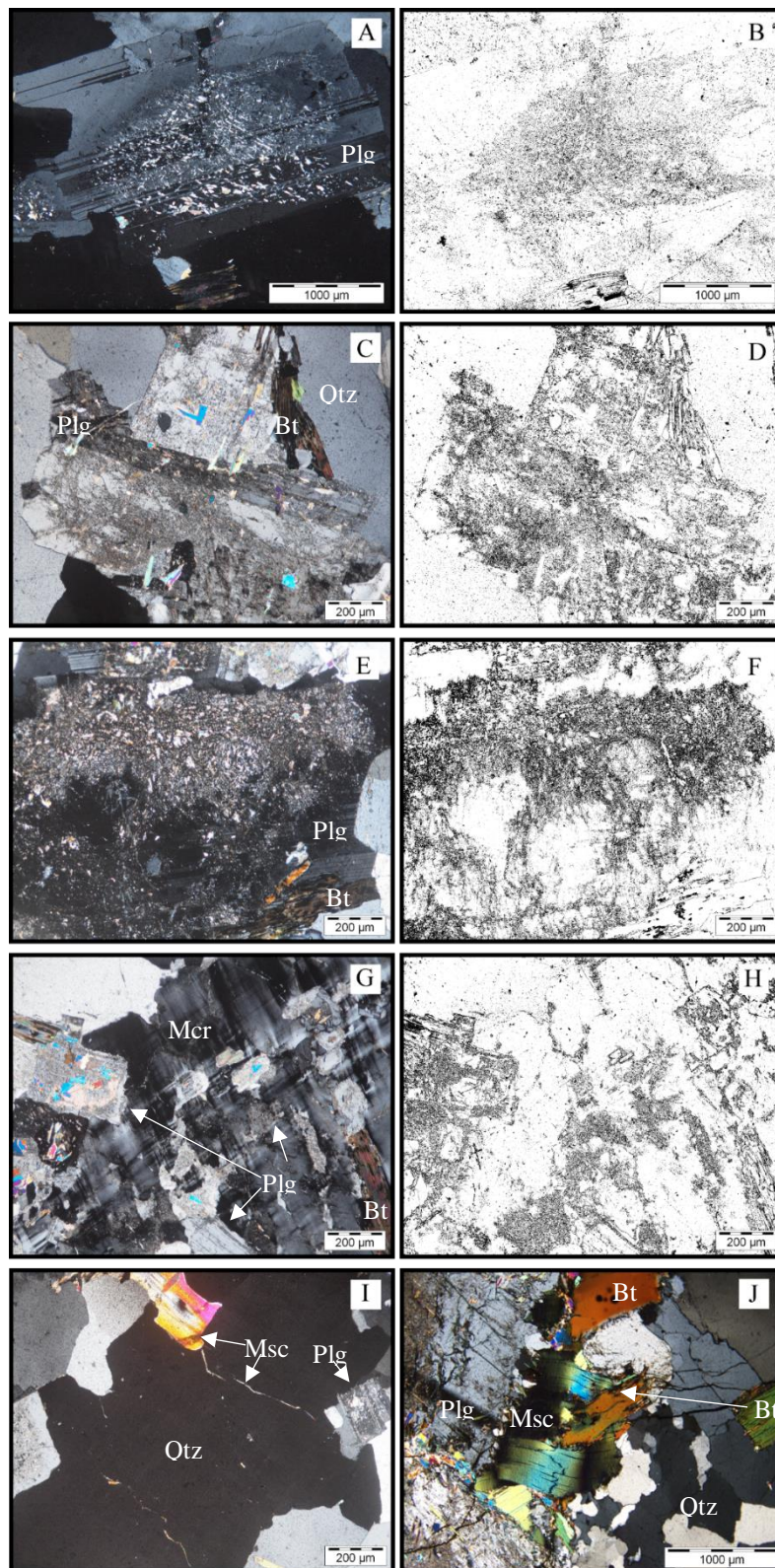


Figura 4.11 – A) Plagioclase zonada, com alteração mais intensa no núcleo (Fração GR18-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Dois cristais de plagioclase junto a quartzo (Fração GR18-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Cristal de plagioclase bastante alterado e biotite cloritizada (Fração GR18-V); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Megacristal de microclina com inclusões de plagioclase e biotite (Fração GR18-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Fraturas intracristalinas num cristal de quartzo preenchidas por moscovite (Fração GR18-N); J) “kink folds” em cristais de biotite e moscovite (Fração GR18-V) (fotomicrografias em NX).

Relativamente à libertação de sódio, expressa no Gráfico A da Figura 4.12, a fração GR18-N registou uma taxa positiva, elevada, até a nona semana de ensaio, a partir da qual sofreu um decréscimo. A fração alterada (GR18-A) à semelhança do que acontece com a GR18-V, apresentava taxas de libertação negativas até à segunda amostragem, modificando-se à vigésima sexta semana, quando adquiriu valores de libertação de sódio superiores aos registados pela GR18-N.

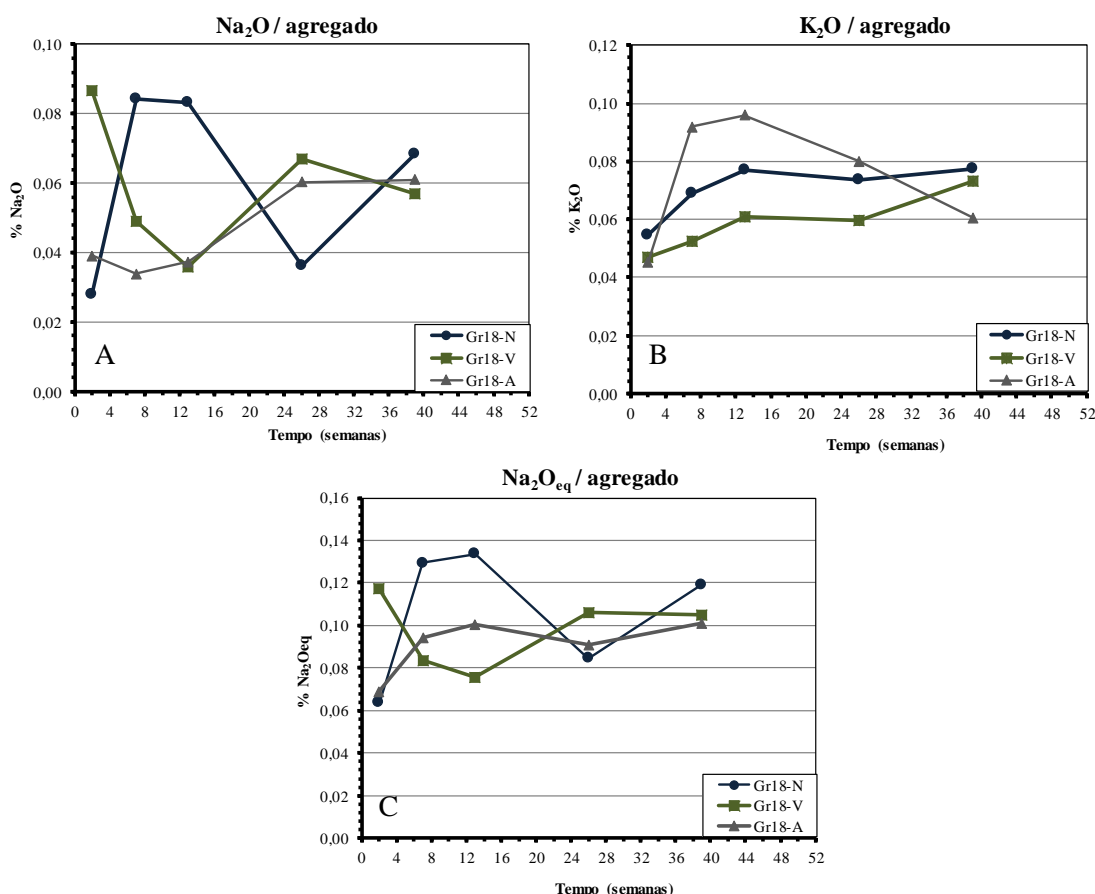


Figura 4.12 - Gráfico A - Libertação de sódio das três frações do granito GR18; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR18; Gráfico C - Libertação de Na₂O_{eq} das três frações do agregado GR18.

Este aumento na libertação de álcalis alterou-se mais uma vez na quarta amostragem; o GR18-V apresentou taxas negativas atingindo 0,058 %, e o GR18-A estabilizou a 0,061 %.

As oscilações apresentadas pelas frações GR18-N e GR18-V podem ser provavelmente explicadas pelas variações de conteúdo em sódio das plagioclases, uma vez que a petrografia mostra zonamentos nos cristais desses minerais.

No entanto, a fração GR18-V é a que evidenciou maiores indícios de alteração e deformação, apresentando um comportamento idêntico ao registado pela fração alterada.

A partir do Gráfico B da Figura 4.12 conclui-se que a libertação de potássio para a solução ocorreu de forma semelhante em duas das frações. GR18-N e GR18-V registam, no início do ensaio, taxas de crescimento de libertação de álcalis que, após a segunda amostragem, estabilizaram. Contudo, a fração GR18-V após a quarta amostragem voltou a registar uma taxa positiva de libertação de potássio. A fração GR18-A, que inicialmente apresentava uma taxa de libertação superior à das outras frações, após a oitava semana adquiriu taxas negativas, registando-se um decréscimo acentuado até ao final do ensaio. Este facto dever-se-á, possivelmente, à redução de álcalis nos seus feldspatos e à precipitação de compostos que os incorporam.

As frações GR18-N e GR18-V, quanto à libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (Figura 4.12 – Gráfico C), experimentaram comportamentos semelhantes aos descritos para a libertação de sódio, embora apresentassem menores amplitudes de valores. A GR18-A apresentou inicialmente uma taxa de libertação positiva que estabilizou a partir da décima terceira amostragem.

4.2.4. Agregado GR21

O local de exploração do agregado designado por GR21 encontra-se num maciço granítico que se enquadra na Zona Galiza Média-Trás-os-Montes, cartografado na Carta Geológica de Portugal Folha 6-A, Montalegre, à escala 1:50.000 (Noronha *et al.*, 1983).

O granito explorado na pedreira foi estudado por vários autores relativamente à petrografia (Neiva, 1958; Noronha *et al.*, 1983) e quanto à caracterização de diferentes graus de alteração (Neiva *et al.*, 1965). O granito sin-D3 de grão médio a grosseiro, de duas micas, apresenta megacristais de feldspato e uma certa orientação das micas. O maciço granítico é caracterizado pela existência de várias zonas com alteração intensa e profunda, o que, de acordo com os autores anteriormente referidos, poderá ser atribuído possivelmente às numerosas falhas geológicas registadas no local de exploração.

A partir do grau de alteração que as partículas apresentavam foi possível definir três frações neste agregado (Figura 4.13). Uma das frações era composta por granito são, designada por GR21-N (Figura 4.13 - A), uma outra onde os feldspatos ostentavam uma coloração avermelhada, designada GR21-V (Figura 4.13 - B) e, por fim, uma fração com indícios de alteração, denominada GR21-A (Figura 4.13 - C).

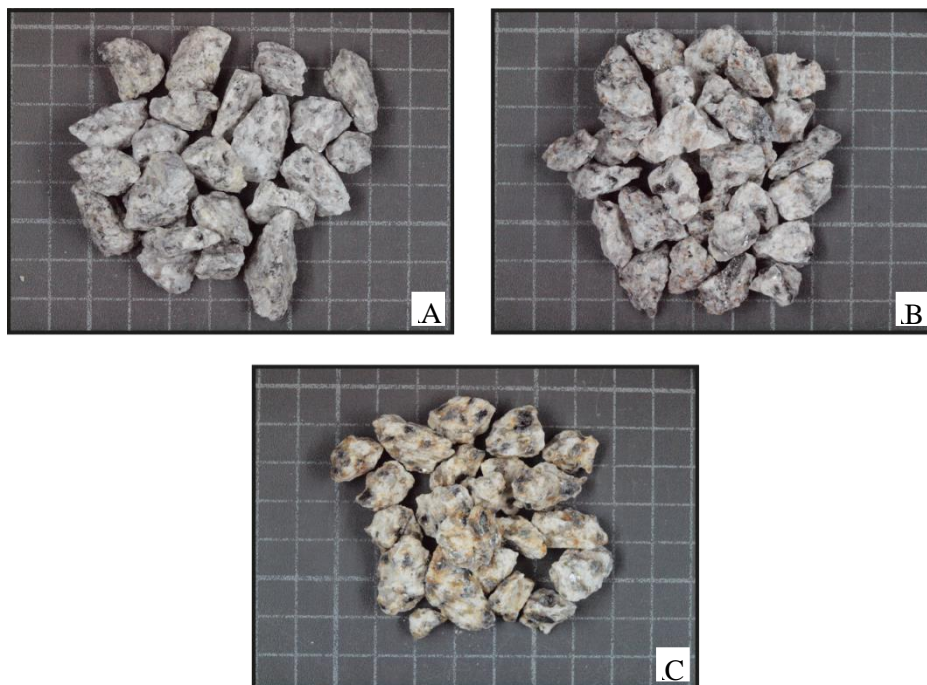


Figura 4.13 - Frações do agregado GR21 (grelha de 1 cm); A - Fração de granito são (GR21-N); B - Fração sã com feldspatos avermelhados (GR21-V); C - Fração de granito alterado (GR21-A).

4.2.4.1. Análise petrográfica

O agregado GR21 apresentava, microscopicamente, uma textura hipautomórfica e é constituído essencialmente por quartzo, feldspatos-K, plagioclase, moscovite, biotite e clorite, podendo exibir ainda,

apatite, esfena, zircão e rútilo. Os cristais mostram com frequência bordos suturados, com exceção da plagioclase, das micas e da silimanite que formam frequentemente cristais subédricos.

Tal como foi referido, neste agregado distinguiram-se três frações: GR21-N (Figura 4.13 - A) com partículas sãs; GR21-V (Figura 4.13 - B) com partículas sãs mas com feldspatos avermelhados e GR21-A (Figura 4.13 - C) com partículas alteradas.

Quanto aos feldspatos foram identificados microclina, ortóclase e plagioclase, esta última maioritariamente albite. Os cristais de microclina apresentam-se anédricos e bem desenvolvidos, com pertites e extinção ondulante, por vezes exibindo indícios de albitização. Estes cristais contêm inclusões de quartzo, plagioclase, moscovite e apatite e encontram-se, por vezes, alterados. Os bordos dos mesmos estão marcados cristais de moscovite microcristalina de orientação aleatória. A ortóclase não é tão comum como a microclina, os seus cristais mostram-se anédricos e alongados, evidenciando, por vezes, alteração. À semelhança da microclina, verifica-se com frequência a existência de extinção ondulante e os seus bordos estão marcados pela presença de pequenos cristais de moscovite.

A plagioclase, essencialmente albite em cristais subédricos, evidencia duas gerações:

- Cristais de albite menos desenvolvidos, que surgem em inclusões na ortóclase;
- Cristais mais desenvolvidos com inclusões de biotite, quartzo e apatite, com indícios de moscovitização, sendo mais intensa nos núcleos e nos limites dos mesmos.

A fração GR21-V possui cristais anédricos com maclas longas e pouco nítidas.

A partir da análise de imagem procedeu-se à quantificação da alteração dos feldspatos nas amostras.

As plagioclases da fração GR21-N apresentam valores até 28 % de área alterada nos seus cristais e os feldspatos-K 27 % (mediana 24 e 21 % respetivamente; Figura 4.14), enquanto GR21-V adquiriram valores até 69 % e 58 % respetivamente (mediana 60 % para as plagioclases e 57 % para os feldspatos-K; Figura 4.14).

Os cristais de feldspatos-K da fração GR21-A apresentam o terceiro quartil a 57 % e as plagioclases a 60 % (mediana 55 e 57 % respetivamente).

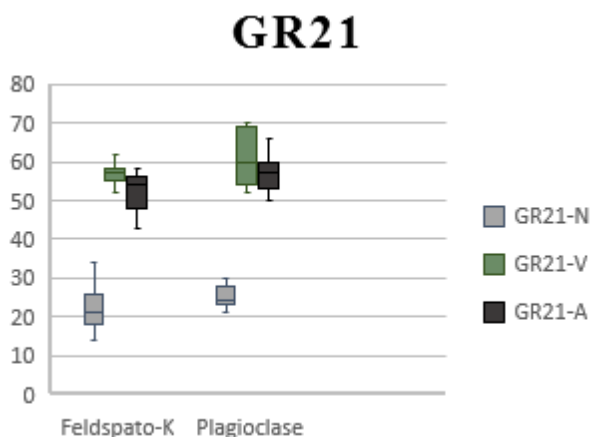


Figura 4.14 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR21.

O quartzo está presente em cristais anédricos, com bordos suturados e evidencia extinção ondulante. Neste granito observa-se subgranulação do quartzo, em cristais de menor dimensão na matriz e com textura deformada (Figura 4.15). Apresenta inclusões de apatite e rútilo e também, frequentemente, inclusões fluidas.

A moscovite surge em cristais subédricos, por vezes em intercrescimento com a biotite, com texturas simplitíticas e também em intercrescimentos com a ortóclase e a microclina. As inclusões de silimanite são frequentes. Nas partículas com alteração mais intensa (GR21-A), alguns cristais de pequenas dimensões, com orientação aleatória, apresentam orlas de cristais de quartzo e feldspato.

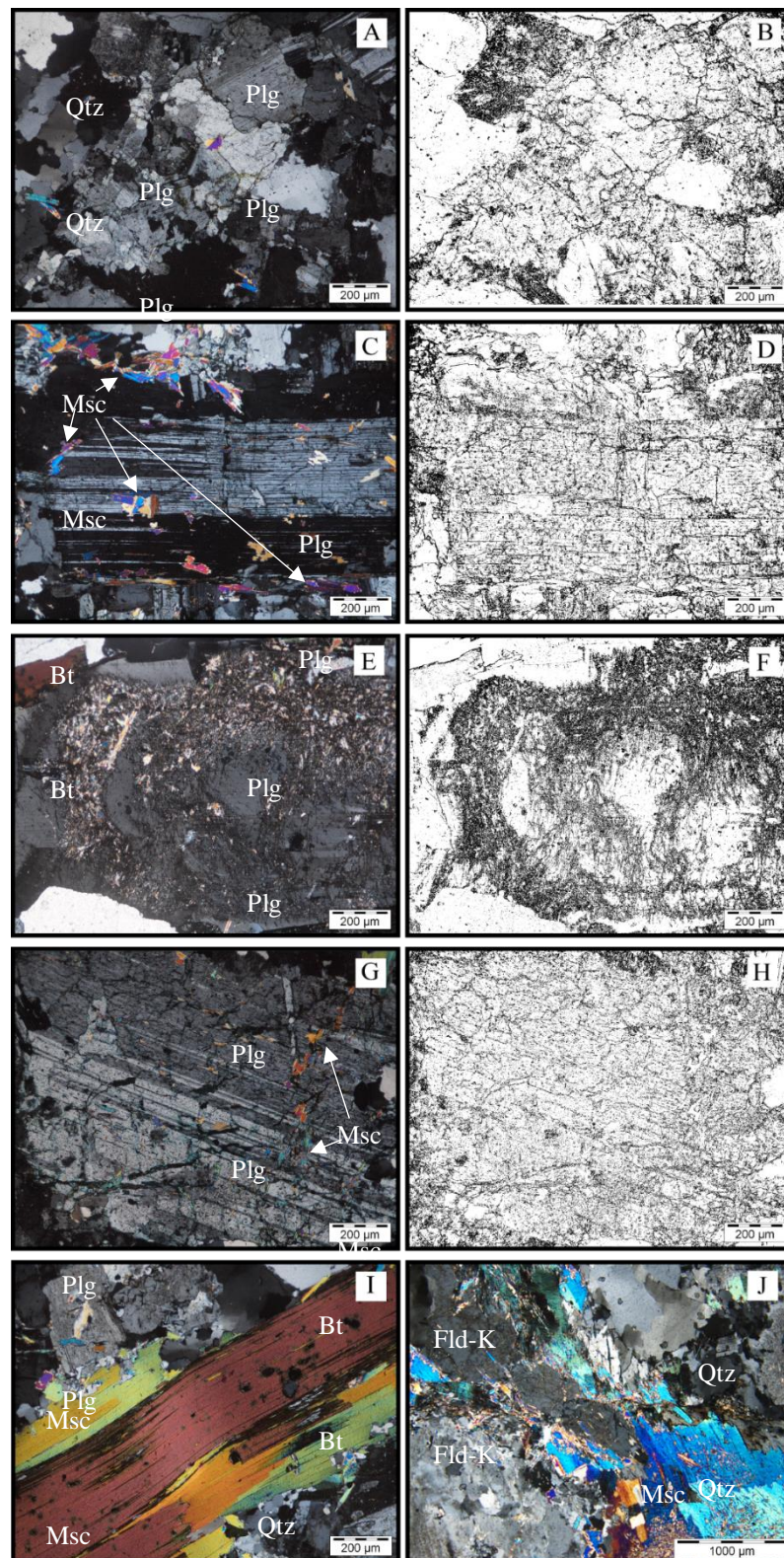


Figura 4.15 – A) Cristais de plagioclase de pequenas dimensões (Fração GR21-V); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração e rede de fraturação; C) Moscovite de pequenas dimensões nos limites de um cristal desenvolvido de plagioclase (fração GR21-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Megacristal de plagioclase com indícios de alteração (Fração GR21-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração mais intensa no núcleo do cristal; G) Plagioclase com rede de fracturação proeminente, por vezes preenchida por moscovite (Fração GR21-V); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração do cristal; I) encurvamento de cristais de biotite e moscovite (Fração GR21-N); J) Subgranulação de cristais e franjas simpletíticas em moscovite (Fração GR21-V); (fotomicrografias em NX).

A biotite ocorre sob a forma de cristais subédricos com clivagens pouco visíveis e em cristais alongados onde estas não se encontram bem marcadas. Apresenta alteração para clorite ao longo dos planos de clivagem, contudo esta última surge em pequena quantidade.

As características descritas ocorrem nas diferentes frações do agregado, embora na fração GR21-A e GR21-V são mais intensas e comuns. Os filossilicatos adquirem orientação preferencial devido à deformação acomodada pela rocha. As redes de fraturas inter- e intra-cristais encontram-se desenvolvidas, muitas vezes preenchidas por quartzo, moscovite e, mais raramente, por óxidos de ferro.

Microscopicamente, a fração GR21-V é aquela que apresenta feldspatos com alteração mais intensa. A microclina prevalece em relação aos outros feldspatos e as plagioclases encontram-se intensamente fraturadas e moscovitizadas. Verifica-se a presença de esfena e a clorite é bastante mais abundante que nas restantes frações, adquirindo, por vezes, forma vermicular. Existem corredores de cristais de quartzo e de feldspatos subgranulados alinhados.

Os principais aspetos de alteração apresentam-se na Figura 4.15.

4.2.4.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 para as três frações do granito GR21 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.16.

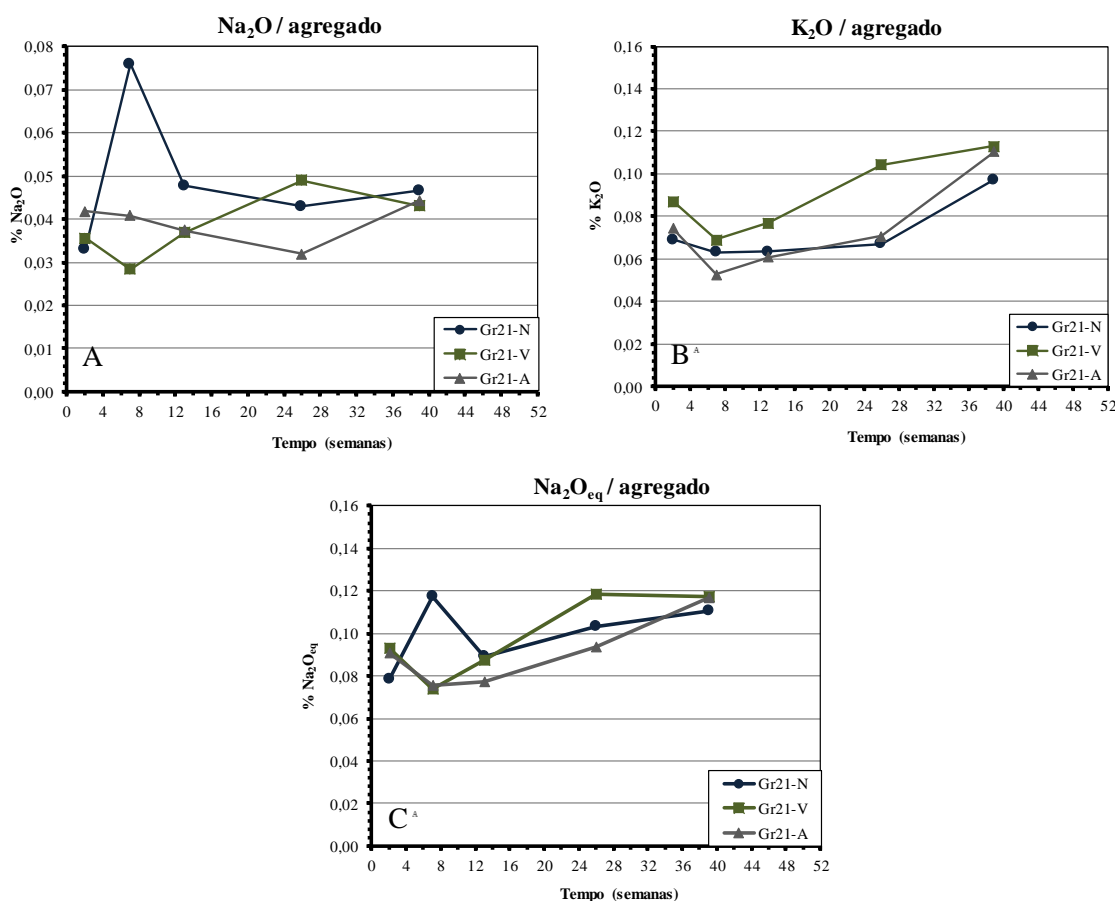


Figura 224.16 - Gráfico A - Liberação de sódio das três frações do agregado GR21; Gráfico B - Liberação de potássio das três frações do agregado GR21; Gráfico C - Liberação de Na₂O_{eq} das três frações do agregado GR21

Pela análise do gráfico A da Figura 4.16 conclui-se que a libertação de sódio para a solução ocorreu de forma distinta dependendo da fração em causa. A fração GR2-A, constituída por partículas de granito alterado, registava uma diminuição quase constante na taxa de libertação de sódio, recuperando apenas após a quarta amostragem. Esta diminuição do sódio em solução, demonstrada pelo gráfico, traduziu-se numa menor libertação de Na^+ pelas partículas relativamente à quantidade de sódio que foi incorporada nos compostos que precipitaram.

A partir do gráfico A da Figura 4.16 foi possível constatar que a fração GR21-N inicialmente adquiriu uma taxa de libertação de sódio elevada, mas que, a partir da sétima semana, esta diminuiu até estabilizar. A oscilação inicial verificada pela fração referida poderá dever-se à presença de duas gerações de albite, uma do tipo megacristais e outra com cristais de pequena dimensão. Assim, a área específica total dos cristais de plagioclase seria elevada no início do ensaio, tendo-se registado uma grande libertação de sódio. A terceira fração, GR21-V, experimentava um decréscimo da taxa de libertação de sódio até à sétima semana de ensaio, após a qual se verificava uma taxa de libertação positiva até à quarta amostragem, quando voltava a decrescer.

Relativamente à libertação de potássio ao longo do tempo (Figura 4.16 – Gráfico B), as três frações do GR21 apresentaram comportamentos similares. Inicialmente verificou-se decréscimo na quantidade de K libertado, mas após a sétima semana ocorreu aumento na libertação desse catião. Contudo, os teores de libertação diferiram de amostragem para amostragem, terminando GR21-N a 0,099 %, GR21-V a 0,112 % e GR21-A a 0,110 %. A fração composta por granito são (GR21-N) mostrou valores de libertação de potássio finais inferiores às restantes, tendendo para a estabilização. Contudo, entre a segunda e a décima sexta semana, esta fração superou os valores registados para GR21-A e GR21-V.

Relativamente à quantidade total de álcalis libertados durante o ensaio ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), expressa no Gráfico C da Figura 4.16, as partículas das frações GR21-V e GR21-A apresentaram comportamento semelhante ao descrito para o gráfico de libertação do potássio, enquanto GR21-N acompanhou a tendência referente à libertação de sódio até à terceira amostragem.

4.2.5 Agregado GR23

A pedra que produz este agregado localiza-se na zona Centro Ibérica, num maciço granítico que corta diferentes formações do Complexo Xisto-Grauváquico. Este granito sin-D3 encontra-se cartografado na folha 13-B – Castelo de Paiva da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50.000 (Cândido de Medeiros, 1964; Figura 4.17).

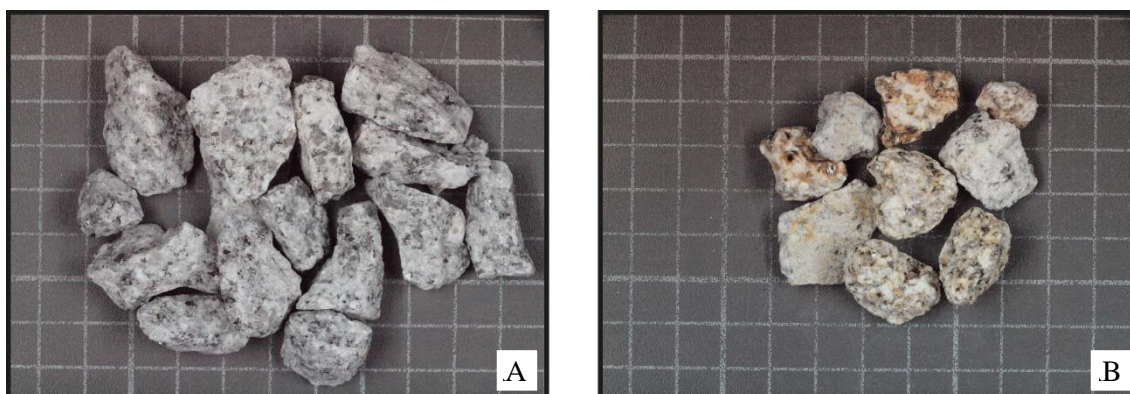


Figura 4.17 - Agregado GR23 (grelha de 1 cm); A - Fração de granito são (GR23-N); B - Fração de granito alterado (GR23-A).

O agregado GR23 é composto por um granito porfiróide de grão médio com alguns megacristais de feldspato (Figura 4.17).

Tendo em conta o grau de alteração, identificaram-se duas frações no agregado, uma composta por granito são, designada por GR23-N (Figura 4.17 - A), e outra com indícios de alteração – denominada por GR23-A (Figura 4.17 - B).

4.2.5.1. Análise petrográfica

O agregado GR23 apresenta, microscopicamente, uma textura porfiróide, de base hipidiomórfica granular média e é composto por quartzo, feldspato potássico, plagioclase, biotite, clorite e moscovite, podendo ainda apresentar, como minerais acessórios, zircão, apatite, andaluzite, silimanite, turmalina, rútilo acicular e minerais opacos (óxidos de ferro e pirite).

Os cristais de feldspato potássico, maioritariamente a ortoclase, apresentam regularmente hábito subédrico, encontrando-se frequentemente alterados para caulinite. Os cristais de ortoclase exibem dimensões superiores aos da microclina.

As plagioclases são constituídas por albite e oligoclase, sendo esta última a mais frequente. Os cristais ocorrem menos frequentemente que os feldspatos-K e são, por norma, euédricos a subédricos, com zonamento químico. Os cristais mostram-se muito alterados, sendo esta alteração mais intensa do que a registada nos feldspatos-K. No núcleo dos cristais de plagioclase verifica-se por vezes a formação de placas de moscovite paralelas ou perpendiculares aos planos de macla. Os cristais apresentam maclas pouco definidas. Observam-se algumas mirmequites.

A quantificação da alteração dos dois tipos de feldspato nas diferentes amostras foi obtida através da análise de imagem. A maioria dos feldspatos-K da fração GR23-N registam áreas até 21% alteradas (mediana 20%; Figura 4.18). As plagioclases destas mesmas partículas de agregado ocorrem maioritariamente com valores até 25 % de área alterada (mediana 22 %; Figura 4.18).

Na fração GR23-A, os cristais de feldspato-K apresentam alteração até 27% da sua área e no caso das plagioclases 33 % (mediana 24 e 25 %, respetivamente; Figura 4.18).

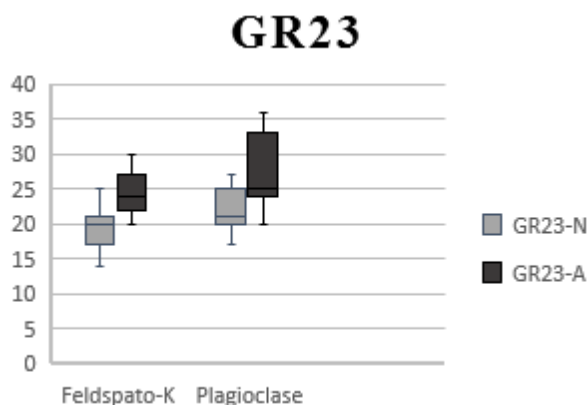


Figura 4.18 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR23.

No agregado GR23 os cristais de quartzo ocorrem em dimensões variáveis, com bordos suturados a ondulados, podendo apresentar *bulging* nos contactos e extinção ondulante, mais ou menos elevada (Figura 4.19). Observam-se agulhas de rútilo inclusas. Ocorrem formas de quartzo gótico (em percentagens diminutas) e mirmequites.

Os filossilicatos surgem em aglomerados lamelares de biotite, moscovite e clorite. A biotite, de cor castanha, ocorre por vezes descolorada, apresentando tonalidade esverdeada, devido à cloritização. Observa-se ainda, com menos frequência, rútilo acicular e esfena.

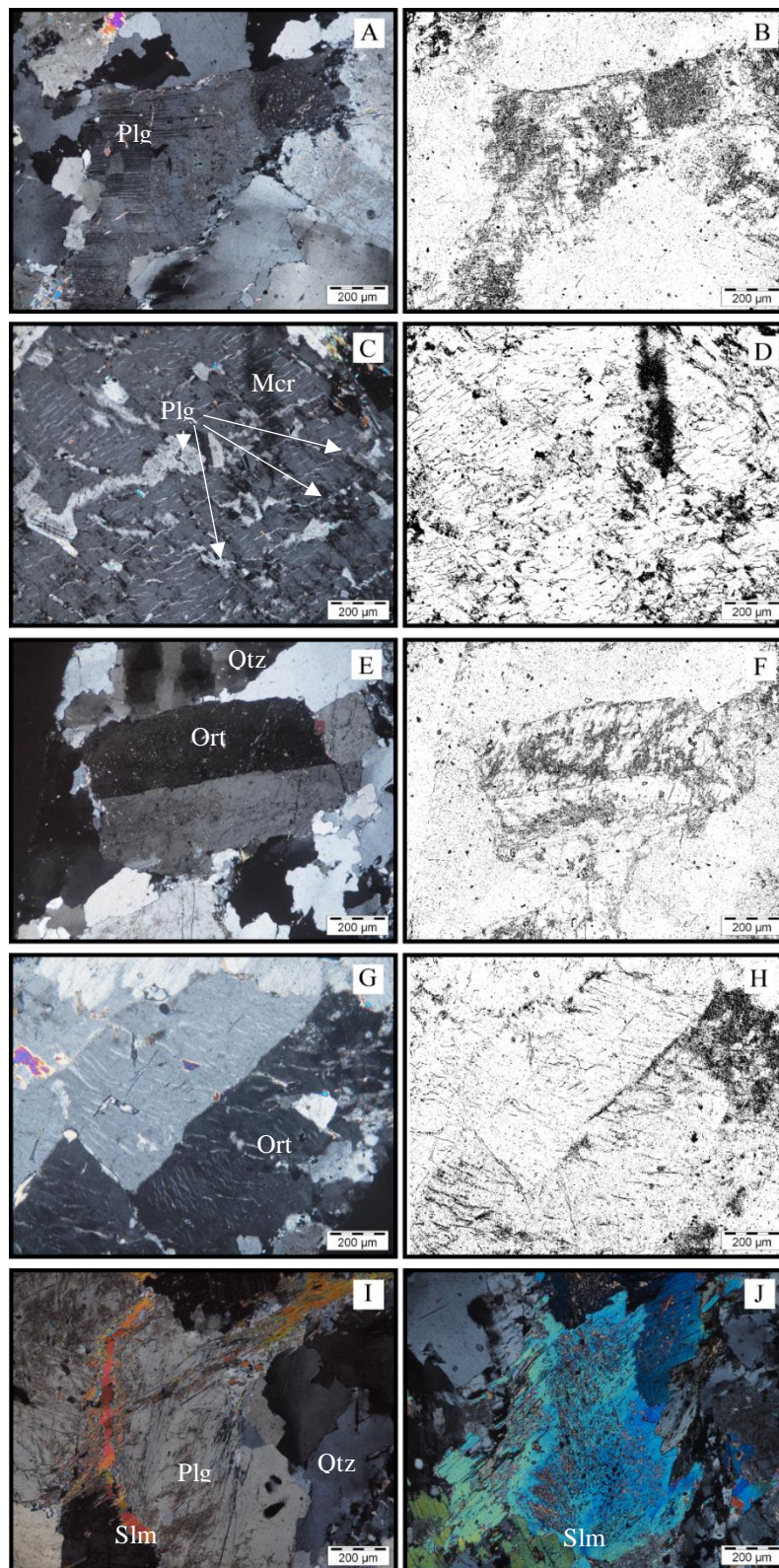


Figura 4.19 – A) Cristais de plagioclase com indícios de alteração (Fração GR23-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração da plagioclase; C) Megacrystal de microclina com albitização e inclusões de biotite (Fração GR23-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração e fraturação; E) Cristal de ortoclase com macla de Carlsbad (Fração GR23-N); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração do feldspato; G) Cristal de ortoclase perítico (Fração GR23-N); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Fraturas reenchidas por moscovite e silimanite (GR23-A); J) Cristal de moscovite contendo silimanite e mostrando franjas simpletíticas (Fração GR23-A); (fotomicrografias em NX).

Os cristais de moscovite não são tão comuns como os de biotite, sendo também de menores dimensões, possuindo muitas vezes franjas simpletíticas. Este mineral encontra-se em geral a preencher fraturas intracristalinas em cristais de quartzo.

Observava-se ainda calcite intergranular ou como produto de alteração de plagioclases.

Na fração alterada (GR23-A) a biotite encontra-se intensamente cloritizada, as plagioclases e os feldspatos apresentam-se mais argilizados, estando a quase totalidade dos cristais afetados. A subgranulação e a extinção ondulante do quartzo são um pouco mais intensas do que as registadas para a fração GR23-N e a moscovite apresenta estruturas simpletíticas mais frequentemente.

Na Figura 4.19 observam-se os principais aspetos de alteração da rocha. As imagens obtidas por tratamento de imagem das fotomicrografias realizadas ao microscópio ótico realçam a alteração da plagioclase e do feldspato-K.

4.2.5.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 para as duas frações do granito GR23 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.20.

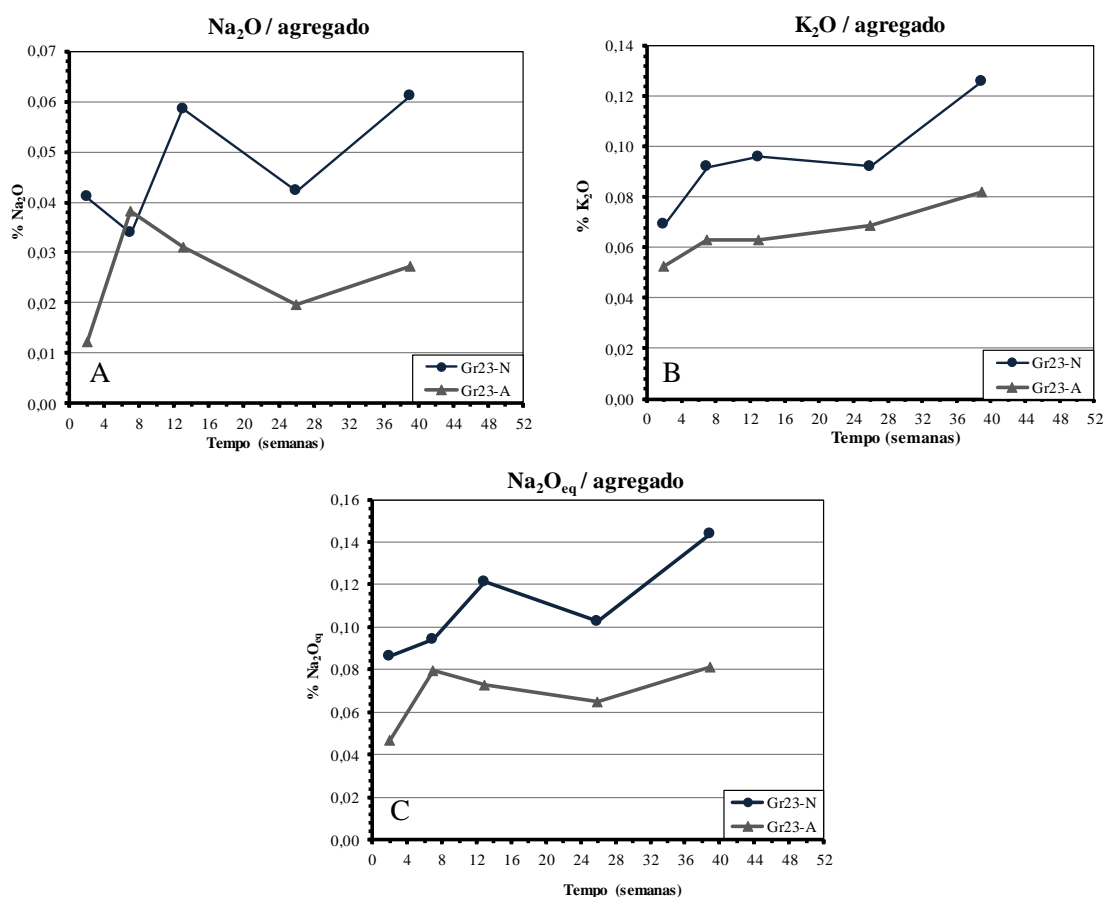


Figura 4.20 - Gráfico A - Liberação de sódio das duas frações do agregado GR23; Gráfico B - Liberação de potássio das duas frações do agregado GR23; Gráfico C - Liberação de Na₂O_{eq} das duas frações do agregado GR23.

Relativamente à libertação de sódio (Figura 4.20 – Gráfico A), é possível constatar que a fração constituída por rocha sã (GR23-N) deste agregado registou decréscimo inicial, invertendo o comportamento à sexta semana de ensaio. Contudo, os resultados desta fração (GR23-N) mostravam oscilações, observando-se

diminuição na libertação de sódio à vigésima sexta semana, e voltando depois a adotar um comportamento positivo semelhante ao período compreendido entre a segunda e terceira amostragem. As plagioclases presentes neste agregado apresentaram, à semelhança do agregado GR18, um zonamento químico, onde a lixiviação de áreas mais ricas em sódio poderá ser responsável pelas diferentes quantidades de Na libertado ao longo do ensaio. A fração GR23-A apresentou comportamento diferente, registando-se um incremento inicial na libertação de sódio até à sétima semana, onde se atingiu o valor máximo de 0,039 %, voltando posteriormente a decrescer após esta data. No entanto, após a quarta amostragem a taxa de libertação desta fração voltou a adquirir valores positivos, embora inferiores aos registados no início do ensaio.

Relativamente à libertação de potássio (Figura 4.20 – Gráfico B), o agregado apresentou em geral uma libertação crescente desse álcali por parte das duas frações. Tanto GR23-A como GR23-N registaram uma taxa de libertação acentuada entre as duas primeiras amostragens, sendo a fração sã a que adquiriu valores superiores. Saliente-se que esta fração, após a sétima semana, começou a estabilizar, sofrendo novo incremento apenas à vigésima quarta amostragem.

Relativamente à libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (Figura 4.20 – Gráfico C), as duas frações do agregado GR23 apresentaram aumento de libertação de álcalis, que decresceu após atingir um valor máximo. O decréscimo que se verificou até cerca da vigésima sexta semana foi substituído por um aumento da libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ até ao final do ensaio.

4.2.6. Agregado GR24

As partículas do agregado GR24 são provenientes de uma pedreira localizada numa mancha granítica cartografada na carta geológica à escala 1:50 000, 13-D, Oliveira de Azeméis (Pereira *et al.*, 2006). As partículas deste agregado são compostas por um granito tardi- a pós-D3 de duas micas.

À semelhança das amostras anteriores, foi possível separar no agregado duas frações distintas: uma composta por granito são, designada por GR24-N (Figura 4.21 - A), e outra com partículas alteradas, referenciadas por GR24-A (Figura 4.21 - B).

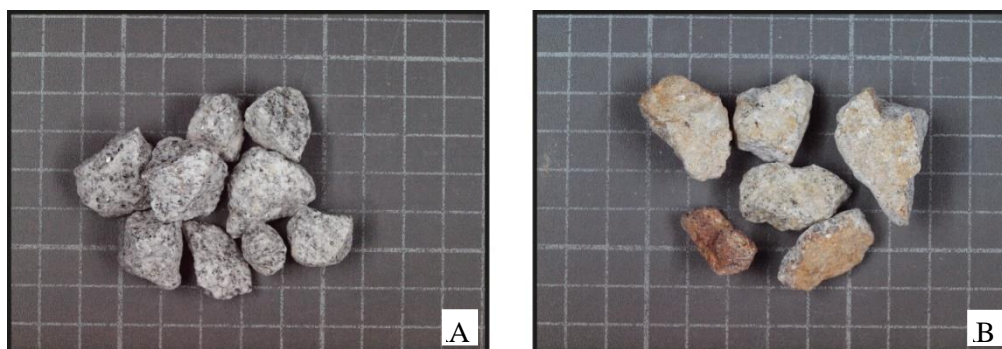


Figura 4.21 - Agregado GR24 (grelha de 1 cm); A - Fração de granito são (GR24-N); B - Fração de granito alterado (GR24-A).

4.2.6.1. Análise petrográfica

O agregado GR24 apresenta textura hipidiomórfica, sendo constituído essencialmente por quartzo, feldspato-K, plagioclase, biotite, clorite e moscovite.

Nas amostras estudadas encontram-se ortoclase e microclina, sendo a primeira a que ocorre mais frequentemente. Estes minerais ocorrem em cristais subédricos, bem desenvolvidos. Os feldspatos

potássicos, por vezes peritíticos, encontram-se menos alterados do que as plagioclases, não apresentando fortes indícios de alteração.

As plagioclases são menos abundantes que o feldspato-K, exibindo cristais por norma com formas euédricas a subédricas e tendo indícios de alteração, mais intensa no núcleo. Neste agregado identificou-se dois tipos de plagioclase: albite e oligoclase, ocorrendo em percentagens semelhantes; evidenciam algum zonamento, e encontram-se muito sericitizadas.

As partículas do agregado GR24 apresentam diferentes áreas com indícios de alteração nas superfícies de cristais de feldspato, que foram quantificadas através da análise de imagem. A fração GR24-N revela 31 % de área alterada como valor do terceiro quartil para os cristais de feldspatos-K e 37 % em plagioclases (mediana 28 e 35 % respetivamente; Figura 4.22). Nas partículas de GR24-A, as áreas alteradas para as plagioclases correspondem a valores compreendidos até 40% da superfície dos cristais e 35 % para os feldspatos-K (mediana 35 e 34 % respetivamente; Figura 4.22).

No agregado GR24 o quartzo surge em cristais de diferentes dimensões, por vezes com bordos suturados ou ondulados e sendo frequente encontrar subgranulação. Observam-se mirmequites e quartzo gótico, mas também quartzo microcristalino entre alguns cristais de maiores dimensões. Alguns cristais de quartzo apresentam extinção ondulante.

As micas ocorrem em placas lamelares ou em pequenas palhetas. Alguns cristais de biotite encontram-se parcialmente alterados para clorite e com inclusões de minerais opacos. Na moscovite é frequente ocorrerem franjas simpléticas. Esta mica surge em cristais bem desenvolvidos, sendo também possível observar moscovite a preencher pequenas fraturas da rocha.

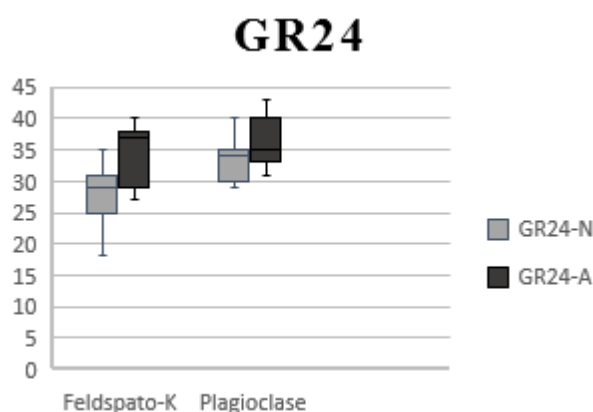


Figura 4.22 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR24.

Na fração alterada (GR24-A), a mais deformada, existe maior quantidade de quartzo de pequenas dimensões, sendo a subgranulação e a extinção ondulante mais intensas. Os bordos dos cristais de quartzo são mais irregulares, as fraturas mais extensas e com preenchimento de moscovite e quartzo. A sericitização das plagioclases é mais marcada, embora o núcleo continue a ser o local onde a alteração é predominantemente. As micas encontram-se bastante deformadas, mas apenas junto a corredores de deformação, onde a moscovite sofre cominuição. Os cristais de micas e de quartzo de menores dimensões mostram alinhamento preferencial.

Os principais aspetos de alteração apresentam-se na Figura 4.23.

4.2.6.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 para as duas frações do granito GR24 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.24.

A libertação de sódio por parte das duas frações deste agregado, representada no gráfico A da Figura 4.24, mostrou crescimento da primeira amostragem para a última, embora em GR24-A se tenha registado uma taxa de libertação deste álcali negativa até à segunda amostragem.

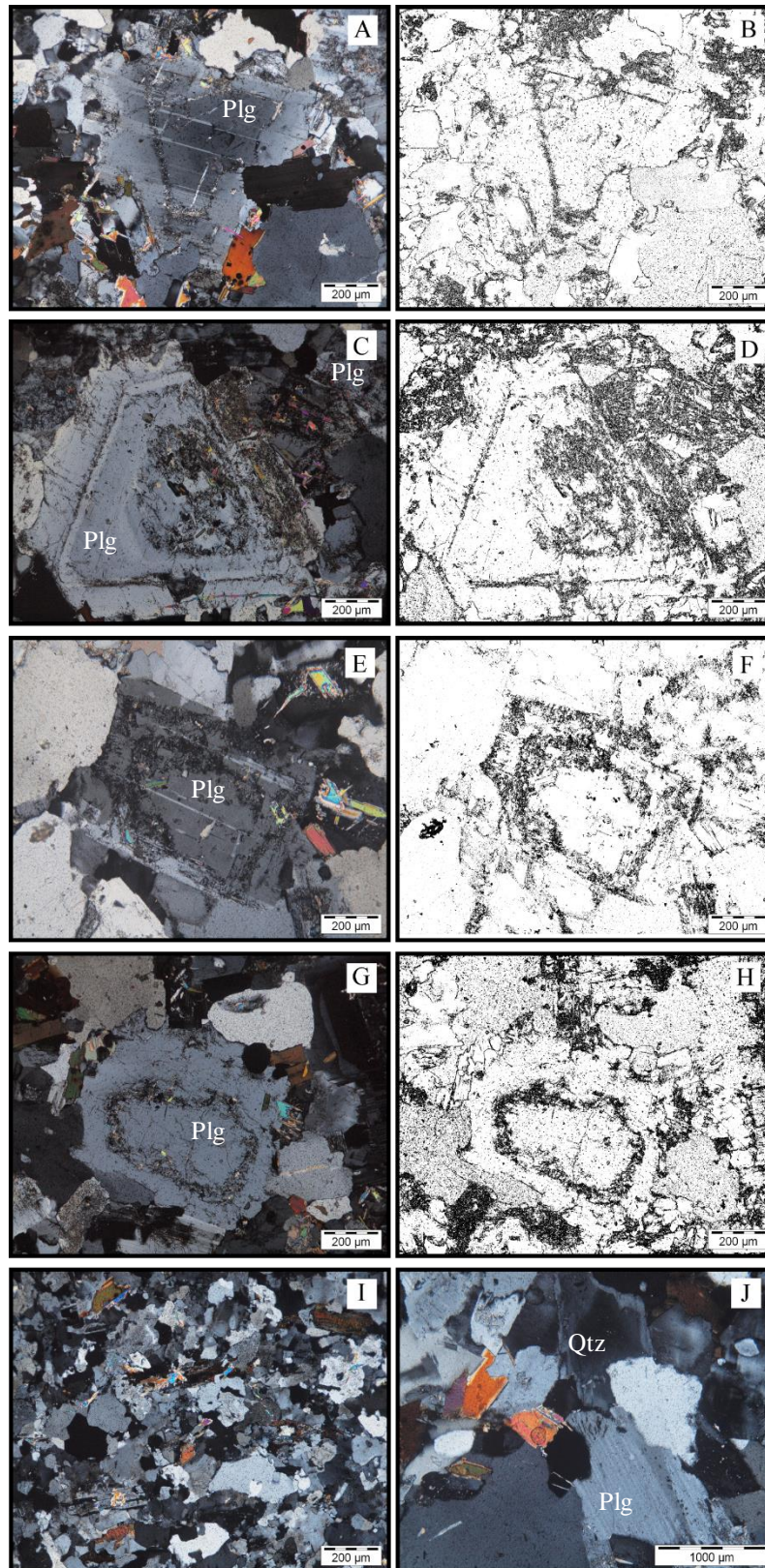


Figura 4.23 – A) Plagioclase zonada, com maior alteração apenas em algumas zonas (Fração GR24-N); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de plagioclase zonado com alteração (Fração GR24-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da imagem C onde se observa a alteração mais intensa no núcleo; E) Cristal de plagioclase zonada, com maior alteração apenas em algumas zonas (Fração GR24-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de plagioclase zonado com sinais de alteração (Fração GR24-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Domínio da rocha de menor granularidade (Fração GR24-N); J) Mirmequites na orla de cristal de plagioclase (Fração GR24-A); (fotomicrografias em NX).

A fração GR24-N que demonstrou diferentes taxas positivas, a partir da quarta amostragem alterou o seu comportamento, adquirindo valores negativos para a mesma. Os núcleos das plagioclases deste agregado apresentavam maiores indícios de alteração das orlas dos cristais que as áreas exteriores dos cristais, o que causou uma maior libertação de sódio no início da lixiviação dos cristais. Consequentemente, com o passar do tempo, e à medida que o decorrer da reação progredia para áreas menos ricas em Na, passou a haver uma menor lixiviação desse catião. É importante salientar que a fração de granito são é a que, no decorrer de todo o ensaio apresentou maiores percentagens de libertação de sódio, devido ao menor grau de alteração desta fração

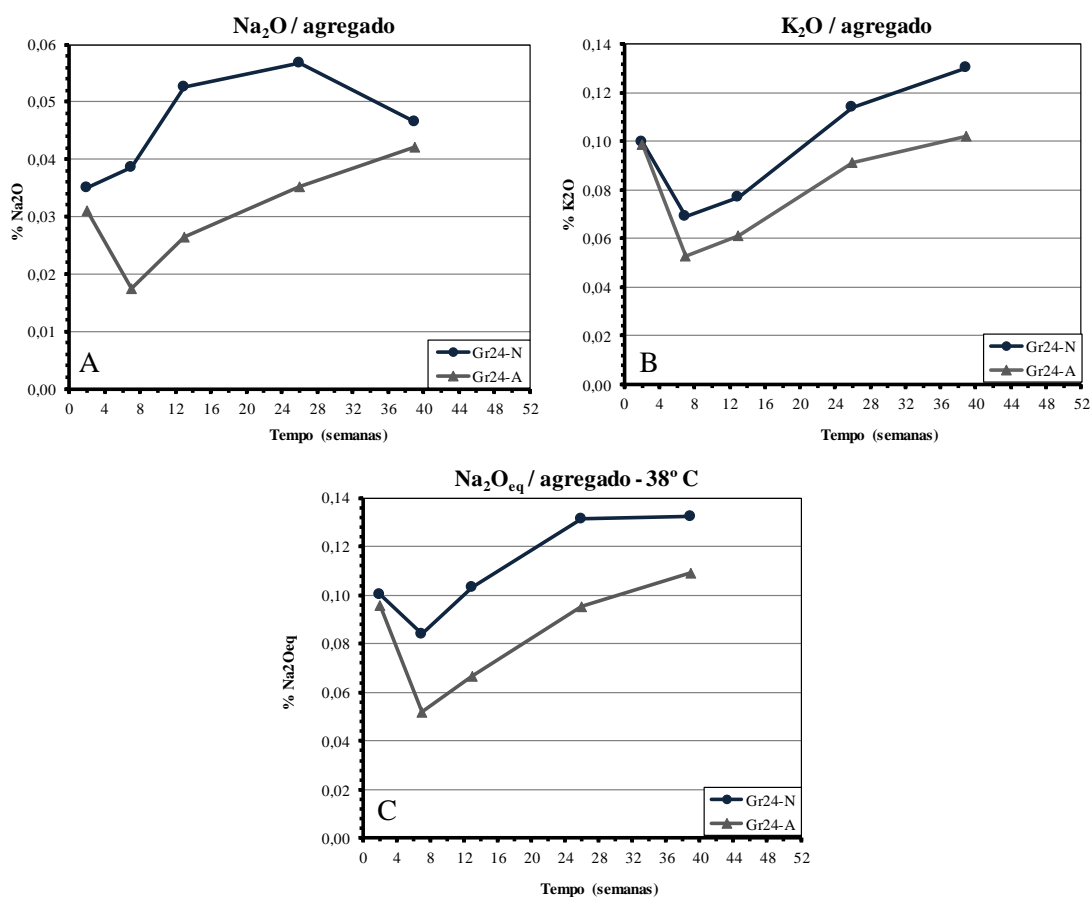


Figura 4.24 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR24; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR24; Gráfico C - Libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ das duas frações do agregado GR24.

Relativamente à libertação de potássio, expressa no Gráfico B da Figura 4.24, ambas as frações registaram o mesmo valor de libertação de K na primeira amostragem. Inicialmente verificou-se decréscimo na libertação deste álcali em GR24-N e GR24-A, mas, após a sétima semana, inverteu-se essa tendência, aumentando depois até à última amostragem.

É importante referir que a fração GR24-N, à semelhança do que ocorria com o sódio, libertou maiores quantidades de potássio do que GR24-A logo após a primeira amostragem.

Em relação à libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (Figura 4.24 – Gráfico C), ambas as frações apresentaram o mesmo comportamento descrito para a libertação de potássio, diferindo apenas nas amplitudes dos valores registados e na ligeira estabilização registada após a quarta amostragem para a fração GR24-N.

4.2.7. Agregado GR29

As partículas do agregado GR29 são exploradas numa mancha do granito de Celorico-Matança. Este granito tardi- a pós-D3 de duas micas possui granularidade média e tendência porfiroide (Figura 4.25). Encontra-se cartografado na carta geológica à escala 1:50 000, 17-B, Fornos de Algôdres (Gonçalves *et al.* 1990).

A pedreira de onde são provenientes as partículas deste agregado é bastante heterogénea, existindo localmente uma fração mais fina que outra. Desta forma, a análise petrográfica teve em conta a granularidade das mesmas, tentando registar as diferenças existentes, para além do tamanho do grão. A análise petrográfica teve, no entanto, como principal objetivo a distinção por grau de alteração, como nas restantes amostras (Figura 4.25).

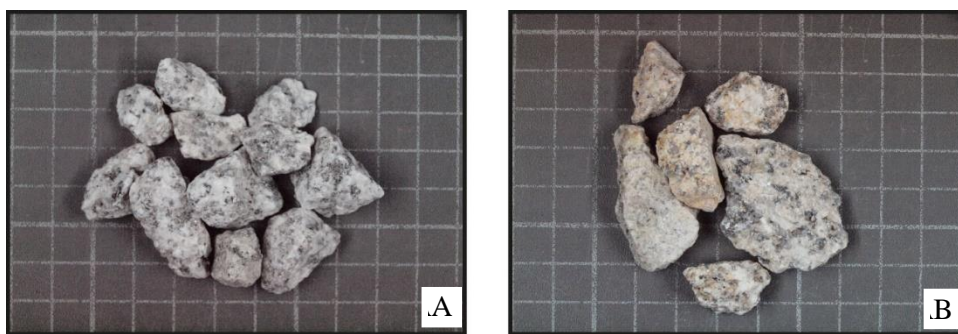


Figura 4.25 - Agregado GR29 (grelha de 1 cm); A - Fração de granito são (GR29-N); B - Fração de granito alterado (GR29-A).

4.2.7.1. Análise petrográfica

O agregado GR29 é constituído essencialmente por quartzo, feldspato-K, plagioclase, biotite e moscovite, podendo apresentar ainda turmalina, zircão, minerais opacos, e/ou apatite.

Os feldspatos deste granito são compostos maioritariamente por feldspato-K, com ortóclase predominante. A ortóclase ocorre em cristais anédricos a subédricos de diferentes dimensões, podendo alguns atingir dimensões consideráveis. Nestes cristais é comum observarem-se inclusões de biotite e plagioclase bem como indícios de albitização.

As plagioclases presentes neste agregado são classificadas como albite e oligoclase, existindo duas gerações diferentes, a saber:

- Cristais frequentemente alterados mais intensamente no núcleo (sericitização);
- Cristais de maiores dimensões, com zonamento.

As plagioclases de menores dimensões apresentam alteração intensa para sericite e calcite+ quartzo.

A quantificação da alteração dos feldspatos foi realizada através da análise de imagem. As plagioclase da fração alterada (GR29-A) apresentam superfícies com 48 % de alteração e os feldspatos-K com 39 % de área alterada (mediana 46 e 35 % respetivamente; Figura 4.26). Os cristais deste último mineral na fração GR29-N ocorrem com 33 % da superfície alterada, enquanto as plagioclases apresentam 34 % (mediana 32 e 29 % respetivamente; Figura 4.26).

No agregado GR29, os cristais de quartzo apresentam-se anédricos, desenvolvidos, com bordos maioritariamente irregulares. Observa-se subgranulação, extinção ondulante e algumas formas de quartzo gótico.

A biotite ocorre em cristais subédricos com algumas inclusões de apatite, zircão e minerais opacos. Esta mica surge em menores percentagens do que a moscovite e encontra-se raramente alterada para clorite.

A moscovite mostra-se predominantemente alterada nas zonas de clivagem, por vezes apresentando franjas simpletíticas (Figura 4.27). Os seus cristais possuem, em geral, maiores dimensões relativamente aos da biotite.

Na fração mais alterada e também mais deformada do agregado (GR29-A), os cristais de quartzo apresentam uma extinção ondulante e subgranulação mais intensas, ocorrendo com grande frequência cristais de quartzo de pequenas dimensões, acompanhadas por moscovite também de pequenas dimensões. As moscovites são bastante frequentes e envolvem cristais de maiores dimensões.

As plagioclases mostram sinais de alteração em todo o cristal, embora o núcleo continue a ser o local onde esta é mais marcada (apresentam-se ligeiramente mais alteradas que os feldspatos-K). Verifica-se a existência de quartzo também a preencher pequenas fraturas.

Os principais aspetos de alteração apresentam-se na Figura 4.27.

4.2.7.2. AAR-8

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 para as duas frações do granito GR29 encontram-se expressos nos gráficos da Figura 4.28.

As frações do agregado GR29 apresentaram distintos comportamentos de libertação de sódio e potássio, respetivamente, Gráficos A e B da Figura 4.28.

Relativamente à libertação de sódio, a fração GR29-N registou taxas positivas até à quarta amostragem, após a qual diminuiu e estabilizou. A fração alterada, GR29-A, registou pequeno decréscimo inicial de 0,003 %, seguido por uma taxa de libertação positiva até à terceira amostragem, quando esta voltou a adquirir valores negativos.

A libertação de potássio demonstrou comportamentos diferentes dos observados para o sódio. As frações GR29-N e GR29-A apresentaram, do início ao final do ensaio, taxas de libertação de potássio positivas. As partículas de agregado constituídas por rocha sã (GR29-N) registaram taxas positivas até à quarta amostragem, adquirindo então um decréscimo na libertação de K, aumentando de novo até ao final do ensaio. A fração GR29-A revelou comportamento quase linear, observando-se apenas uma pequena estabilização entre a segunda e a terceira amostragem.

No geral, ambas as frações registaram crescimento na libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (Figura 4.28 – Gráfico C). Contudo, este foi mais acentuado nas primeiras amostragens, estabilizando no final do ensaio. A fração GR29-N foi aquela que apresentou maior libertação de álcalis.

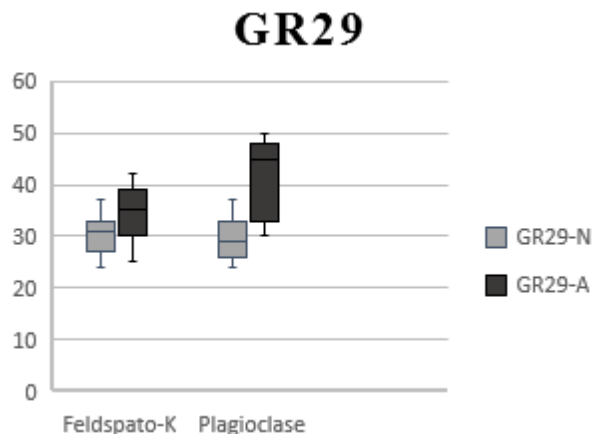


Figura 4.26 - Caixas de bigodes dos dados de análise de imagem para o agregado GR29.

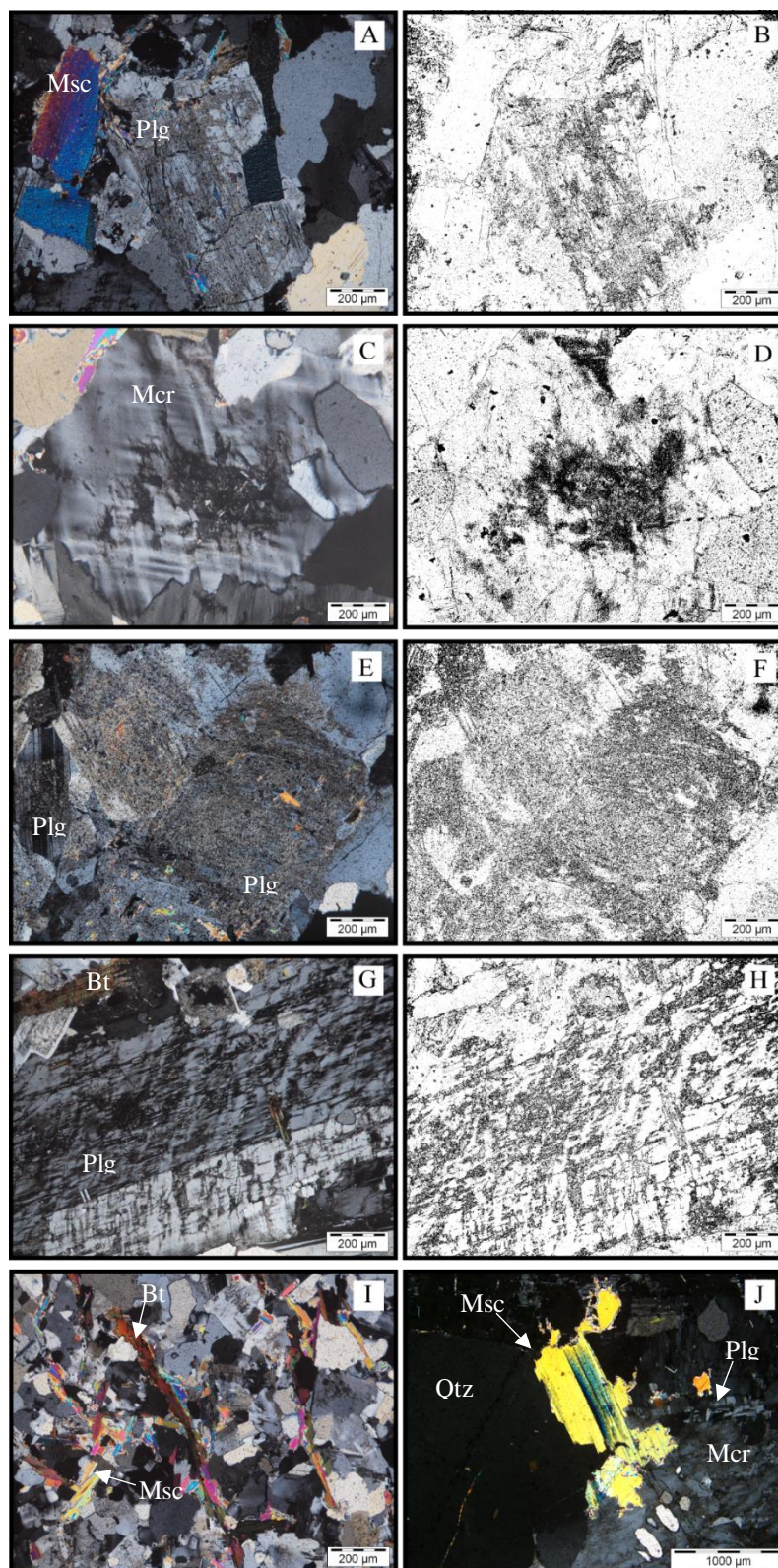


Figura 4.27 – A) Cristal de plagioclase e moscovite alterada (Fração GR29-A); B) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia A onde se observa a alteração dos distintos minerais; C) Cristal de microclina com alteração mais intensa no núcleo (Fração GR29-A); D) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia C onde se observa a alteração dos distintos minerais; E) Cristais de plagioclase bastante alterados (Fração GR29-A); F) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia E onde se observa a alteração dos distintos minerais; G) Cristal de plagioclase com sinais de alteração e fraturação (Fração GR29-A); H) Imagem obtida através de análise de imagem da fotomicrografia G onde se observa a alteração dos distintos minerais; I) Cristais de moscovite e biotite alinhados (Fração GR29-N); J) Cristal de moscovite predominantemente alterado ao longo dos planos de clivagem. (Fração GR29-N); (fotomicrografias em NX).

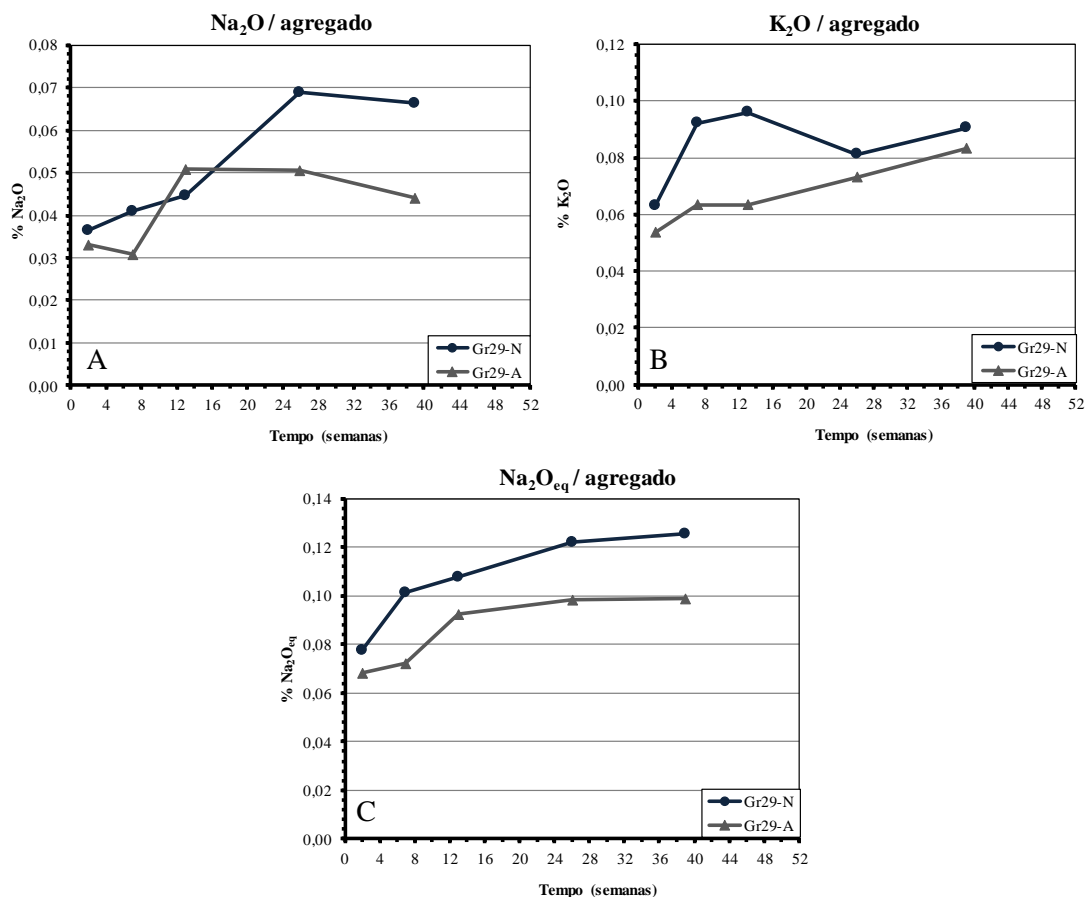


Figura 4.28 - Gráfico A - Libertação de sódio das duas frações do agregado GR29; Gráfico B - Libertação de potássio das duas frações do agregado GR29; Gráfico C - Libertação de Na₂O_{eq} das duas frações do agregado GR29.

4.2.8. Síntese da análise petrográfica, análise de imagem e AAR-8

De acordo com os objetivos do presente trabalho, foram identificados os feldspatos presentes em cada rocha analisada. Para a quantificação da alteração, foi utilizada a análise de imagem que permitiu realçar as variações de alteração e fraturação das amostras para cada uma das frações consideradas.

Observam-se em todas as amostras, tanto em amostra de mão como ao microscópio ótico, pelo menos duas frações que se distinguem pelo seu grau de alteração. A análise petrográfica, juntamente com análise de imagem, comprova que as plagioclases, em geral, são os feldspatos mais alterados nas diversas frações dos agregados estudados. Estes minerais formam frequentemente cristais zonados, com alteração mais intensa no núcleo do que nas orlas dos cristais.

Na Figura 4.29 encontram-se os valores do terceiro e segundo quartil (mediana) obtidos através da análise de imagem para o cálculo da área alterada de cristais de feldspato-K e de plagioclase de cada fração de agregado. Tal como referido anteriormente, o agregado GR21 é o que apresenta indícios de alteração mais intensa e o GR2 o que se encontra menos alterado. As frações alteradas (A) de cada agregado mostram percentagens de área alterada superiores às obtidas para as frações compostas por rocha sã (N).

A análise dos gráficos obtidos no ensaio AAR-8 evidencia que, para todas as amostras, as frações alteradas (A) libertam menos álcalis do que as frações não alteradas (N), embora nas frações alteradas exista maior número de fraturas que vão possibilitar o acesso de fluidos ao interior das partículas de agregados.

Nas frações alteradas, os feldspatos perderam parte do K^+ e Na^+ devido à alteração dos seus minerais, isto é, possuem menores quantidades de álcalis disponíveis, uma vez que estes foram lixiviados durante os processos naturais de alteração. Assim, verifica-se que os mecanismos naturais de alteração têm um papel importante no tipo de álcalis presentes e na sua abundância, sendo mais importantes do que a presença de fissuras, que facilitem o acesso dos fluidos e que aumentam a área específica disponível para o ataque alcalino.

Também se conclui que o conteúdo de K_2O libertado em todas as amostras é maior do que o de Na_2O . Tal pode ser explicado pela existência de maiores quantidades de potássio nas amostras, tal como se verifica na análise química de rocha total. A análise petrográfica confirma que os feldspatos-K, em geral, predominam em relação às plagioclases. Por outro lado, a alteração dos primeiros é menos intensa do que a observada em cristais de plagioclase, levando a que exista menos Na^+ disponível do que K^+ .

A análise petrográfica também permitiu explicar as oscilações registadas na libertação de sódio e de potássio, comprovando que as plagioclases apresentavam um zonamento químico, isto é, a existência de zonas com maiores concentrações de sódio que outras. Assim, quando a frente de reação progredia no mineral, este libertava menos álcalis se a zona que estivesse a ser lixiviada contivesse uma menor concentração desse catião e vice-versa, por exemplo devido à alteração mais intensa.

A análise petrográfica realizada permitiu esclarecer o comportamento das diferentes frações no ensaio AAR-8, uma vez que depende, tal como evidenciado pela análise de imagem, do estado de alteração dos feldspatos presentes nas amostras.

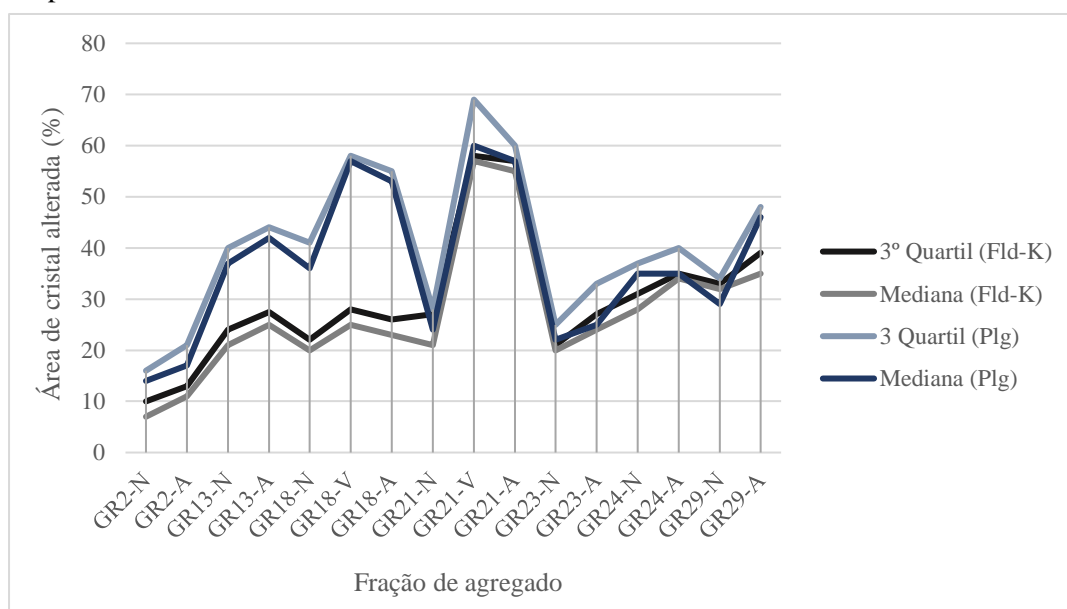


Figura 4.29 - Gráfico dos dados de análise de imagem para as distintas frações dos agregados estudados (N – não alterado; A – alterado)

4.3. Gel Pat Test

Os prismas de betão utilizados neste estudo foram anteriormente empregues em ensaios de expansão AAR-3 e AAR-4.1 no âmbito do projeto IMPROVE. Saliente-se que estes prismas eram compostos pelas partículas dos agregados estudados através do ensaio AAR-8 e da análise petrográfica. No entanto, nos estudos agora realizados, as partículas foram separadas por frações, tendo em conta o seu grau de alteração, enquanto os prismas de betão contêm partículas das diferentes frações.

Para a realização do ensaio Gel Pat Test as amostras foram sujeitas ao protocolo já descrito anteriormente.

Tendo em conta que se esperava a formação de gel, resultante de RAS, sobre as partículas de agregado, verificou-se que os resultados obtidos não corresponderam ao expectável. Assim, não se observou a formação deste produto mas, em contrapartida, os prismas de betão apresentaram diferentes colorações da pasta de cimento no fim do ensaio, o que leva a crer que terá ocorrido uma reação entre os agregados e a pasta de cimento ou entre esta e a solução utilizada no ensaio.

Nas Figuras 4.30 a 4.33 encontram-se imagens dos provetes dispostos por ordem crescente de numeração, uma das imagens foi obtida antes da realização do ensaio e a outra após o mesmo.

No início do ensaio os prismas de betão correspondentes aos agregados GR2, GR23 (ensaio AAR-3) e GR24 (ensaio AAR-4.1) mostravam, uma pasta de cimento de cor cinza claro que, com o decorrer do tempo, se tornou amarelada e com tonalidade mais escura em algumas zonas (Figura 4.30 - A e da Figura 4.32 - A e -B, respetivamente). Nestas amostras foi possível observar ainda a formação de áreas mais claras/amareladas na pasta de cimento junto às partículas de agregado, que se foram expandindo até ao final do ensaio.

O prisma de betão formado pelo agregado GR13 (ensaio AAR-4), com uma cor de cimento semelhante à do GR2 (ensaio AAR-4), exibia, no fim do ensaio, “vénulas” de coloração acastanhada com tonalidade variável (Figura 4.30 - B). Neste prisma a totalidade da pasta de cimento adquiriu também uma cor amarelo-acastanhada, com áreas mais claras que aparentavam ter-se formado no interior das primeiras.

A pasta de cimento dos prismas onde se encontravam as partículas dos agregados GR18 e GR21 (ensaio AAR-4.1) apresentavam inicialmente uma coloração semelhante aos prismas anteriores, embora um pouco mais bege, mostravam no final do ensaio colorações amarelo-esverdeadas (Figura 4.31 - A e -B, respetivamente).

O prisma de betão com partículas do agregado GR29 (ensaio AAR-4) não apresentou mudanças relevantes no decurso do ensaio (Figura 4.33 - A), existindo apenas um ligeiro escurecimento da pasta de cimento em toda a amostra.

De forma a determinar a composição química das áreas com tonalidade castanha e as mudanças que poderiam ter ocorrido na pasta de cimento durante o ensaio, cortou-se, com o auxílio de uma serra mecânica, uma pequena porção do prisma correspondente ao agregado GR24 (ensaio AAR-4). Este agregado foi selecionado por apresentar todas as alterações descritas, sem que estas cobrissem a totalidade da pasta de cimento, e pelas áreas que se observavam não se encontrarem dispersas, mas passando gradualmente de uma a outra. Foi em seguida realizada uma lâmina delgada polida, de forma a permitir o seu estudo ao microscópio ótico, à microsonda e ao MEV/EDS, tendo por objetivo determinar a composição química dos feldspatos a diferentes distâncias relativamente à interface com a pasta de cimento. A análise à microsonda eletrónica visou também a determinação da composição da pasta de cimentos nas diferentes colorações observadas após o final do ensaio.

Definiram-se dois tipos de pasta de cimento tendo em conta a coloração que apresentavam em lâmina delgada quando observadas em luz natural (nicóis paralelos). A passagem de um tipo para o outro ocorria de forma progressiva, existindo uma área intermédia onde as duas tonalidades coexistiam (Figura 4.34 - A e 4.34-B).

A pasta de cimento de coloração acastanhada clara (PC), visível em vénulas em amostra de mão, apresentava cores de tom bege em nicóis paralelos (N//) e mostrava cores de polarização semelhantes às dos carbonatos em nicóis cruzados (NX). Esta pasta ocorria predominantemente perto de cristais de feldspato, desenvolvendo-se em frentes de reação para outras áreas da pasta de cimento.

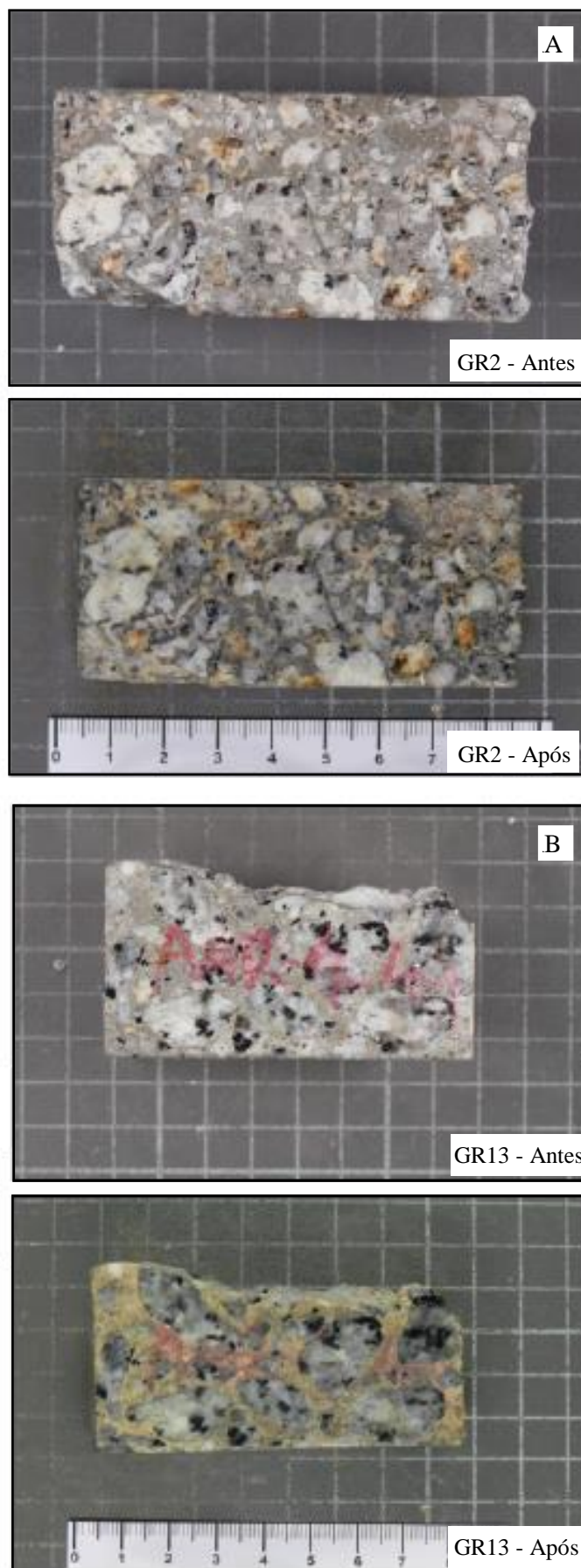


Figura 4.30 — Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR2; B) Betão com partículas de agregado GR13.

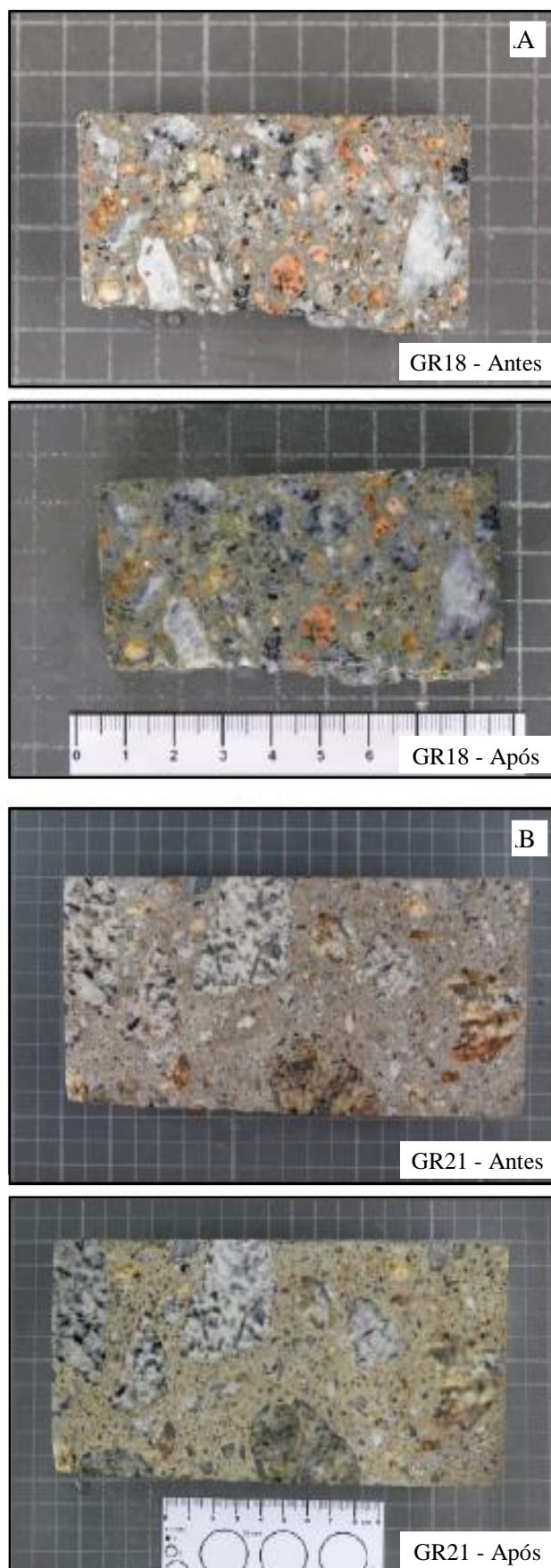


Figura 4.31 -- Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR18; B) Betão com partículas de agregado GR21.



Figura 4.32 - Registro fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR23; B) Betão com partículas de agregado GR24.

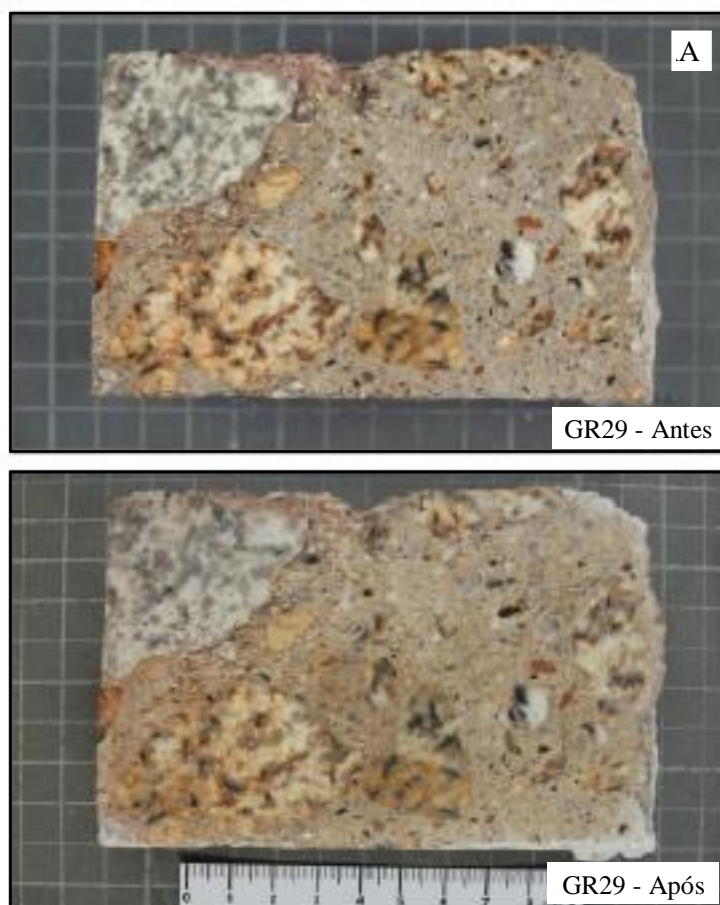


Figura 4.33 - Registo fotográfico das amostras de betão antes e após o ensaio Gel Pat Test: A) Betão com partículas de agregado GR29.

A segunda variante de pasta de cimento ocorria em amostra de mão com cor escurecida (PE). Esta apresentava tons escuros de castanho em luz natural (N//), ao microscópio ótico, amostrando-se isotrópica quando os nicóis se cruzavam (NX; Figura 4.34 - E e -F). Esta coloração e a isotropia são características típicas da pasta de cimento Portland.

A ocorrência de duas pastas de cimento de características e coloração distintas encontra-se, em parte, condicionada pelas partículas de agregados presentes. A pasta de coloração bege (PC) era visível em grandes concentrações junto a agregados grossos, sendo mais frequente quando os minerais que se encontram na interface das partículas com a pasta de cimento eram os feldspatos ou quando as partículas apresentavam uma rede de fracturação mais intensa (Figura 4.34 - C e -D).

Na análise petrográfica do betão desta lâmina delgada foi possível ainda verificar que a pasta de tonalidade muito clara se encontrava essencialmente junto às partículas de granito não alterado (GR24-N). Esta pasta era muito menos abundante, ou mesmo inexistente, junto às partículas do mesmo granito que mostravam alteração (GR24-A).

A análise petrográfica desta lâmina permitiu a definição de áreas de pasta de cimento, dos agregados e do gel com interesse para observação e análise ao MEV/EDS e à microsonda eletrónica.

A análise química qualitativa das duas variantes da pasta de cimento presentes revelou algumas pequenas diferenças composicionais. A PE apresentava, em geral, quantidades de sílica, magnésio e alumínio superiores às da pasta de cor mais clara, contudo, a PC mostrava incrementos em cálcio e ferro. Esta

distinção é mais evidente nas orlas de agregados grossos que continham feldspatos junto aos bordos, tal como descrito anteriormente para as áreas em que a PC ocorria mais frequentemente. Nestas zonas obtiveram-se espectros através do EDS, onde as quantidades de álcalis que a pasta apresentava eram semelhantes às registadas para outros locais (Anexo 3).

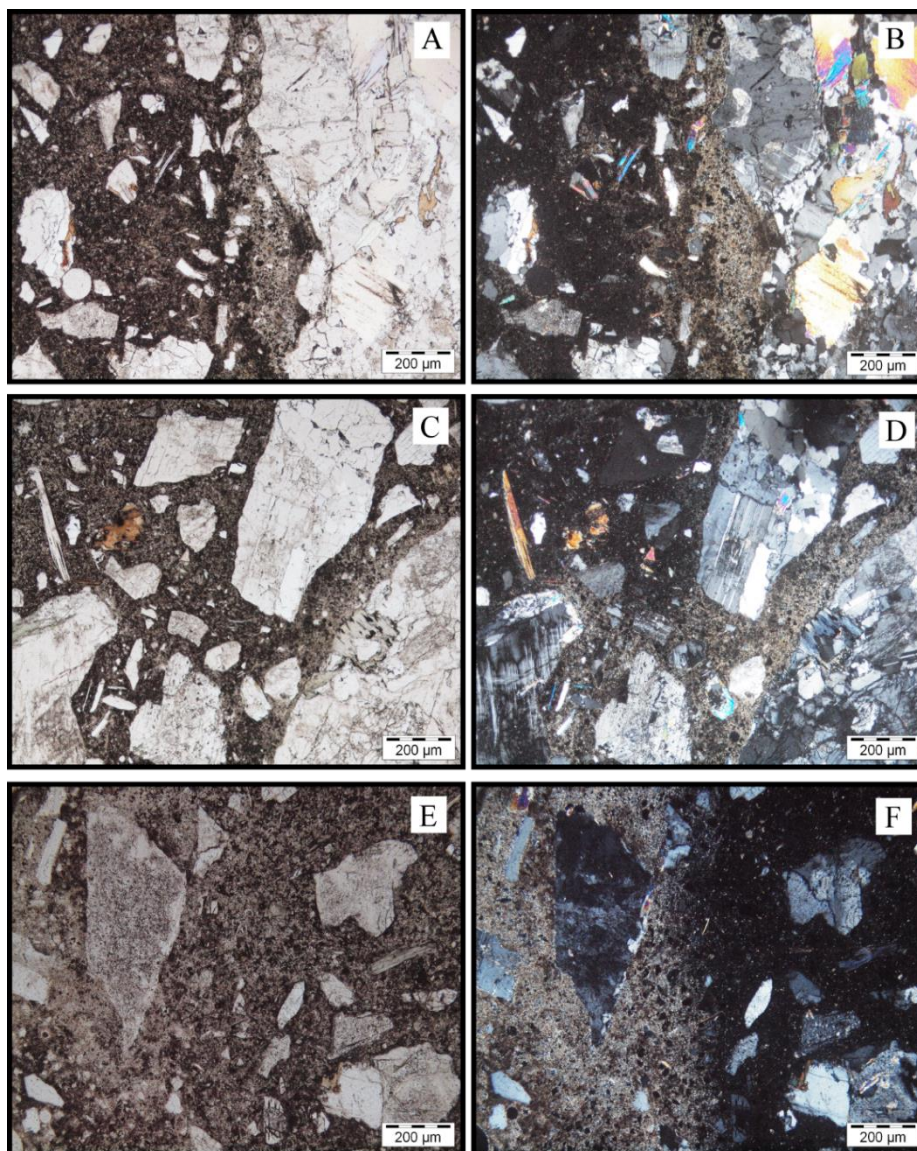


Figura 4.34 – Fotos obtidas ao microscópio ótico de um pormenor do prisma de betão com partículas de agregado GR24: Pequena porção de PC junto a um agregado (nicóis //, A; nicóis X, B); Agregados das diferentes frações e os dois tipos de pasta de cimento (nicóis //, C; nicóis X, D); Limite entre os dois tipos de pasta de cimento sem influência de agregados grossos (nicóis //, E; nicóis X, F).

Os feldspatos presentes nas partículas de agregados desta amostra foram analisados com EPMA. Tanto os cristais de feldspato-K como os de plagioclase apresentavam, quando em contacto com a pasta de cimento, ligeiras diferenças composicionais ao longo do cristal (Anexo 4). Análises químicas realizadas no mesmo cristal mostravam ligeiros empobrecimentos em álcalis perto da interface com a pasta de cimento relativamente às zonas do cristal mais interiores. Tal não é tão evidente nos cristais que se encontravam no interior das partículas de agregado e longe de fraturas (Anexo 5).

É importante referir que ocorriam massas de PC no seio de PE pelo que nas análises da pasta de cimento e nos mapas de elementos é evidente a presença dos dois tipos de pasta (Anexo 6). Contudo, considera-se

que os resultados obtidos são representativos da composição química da pasta presente na área analisada, quer nos espetros quer nos mapas de elementos (Anexo 7).

Os feldspatos presentes nas partículas de agregados desta amostra foram analisados com EPMA. Tanto os cristais de feldspato-K como os de plagioclase apresentavam, quando em contacto com a pasta de cimento, ligeiras diferenças composicionais ao longo do cristal (Anexo 4). Análises químicas realizadas no mesmo cristal mostravam ligeiros empobrecimentos em álcalis perto da interface com a pasta de cimento relativamente às zonas do cristal mais interiores. Tal não é tão evidente nos cristais que se encontravam no interior das partículas de agregado e longe de fraturas (Anexo 5).

É importante referir que ocorriam massas de PC no seio de PE pelo que nas análises da pasta de cimento e nos mapas de elementos é evidente a presença dos dois tipos de pasta (Anexo 6). Contudo, considera-se que os resultados obtidos são representativos da composição química da pasta presente na área analisada, quer nos espetros quer nos mapas de elementos (Anexo 7).

No Anexo 6 encontram-se os resultados obtidos com microsonda eletrónica em vários pontos da pasta de cimento. Os valores altos de alumínio na pasta de cimento de cor mais escura (PE) foram obtidos em partículas de clínquer não hidratadas, visíveis nos mapas de elementos. Em geral a pasta de cimento clara (PC) apresentava uma rede de fracturação mais intensa que a escura (PE). Na PC as partículas que continham o alumínio eram aquelas onde também se acumulava o ferro. A sílica ocorria quando o cálcio não estava presente e vice-versa. O padrão do sódio repetia-se no potássio, embora com menor expressão, isto é, os dois catiões apresentavam valores mais baixos na PC do que na PE.

Neste ensaio, tal como referido anteriormente, foi possível observar pequenas quantidades de gel ao microscópio ótico. A zona onde se verificou a presença de gel foi posteriormente alvo de cinco análises com microsonda - estando as áreas assinaladas por 1, 2, 3, 4 e 5, respetivamente, na Figura 4.35 - a fim de determinar a sua composição química. O estudo com EPMA permitiu verificar a existência de contrastes químicos nos pontos analisados, demonstrando uma relação inversa entre as quantidades presentes de álcalis e sílica. Contudo, é necessário ter em atenção que os resultados obtidos apresentavam erros elevados, provavelmente devido ao mau polimento e revestimento que a amostra apresentava neste local. A composição do gel era variável, tanto em termos dos elementos que podiam estar presentes como das respetivas proporções, o que confirma a não existência de uma fórmula estequiométrica para a sua composição, sendo, por isso, este produto designado gel sílico-alcálico.

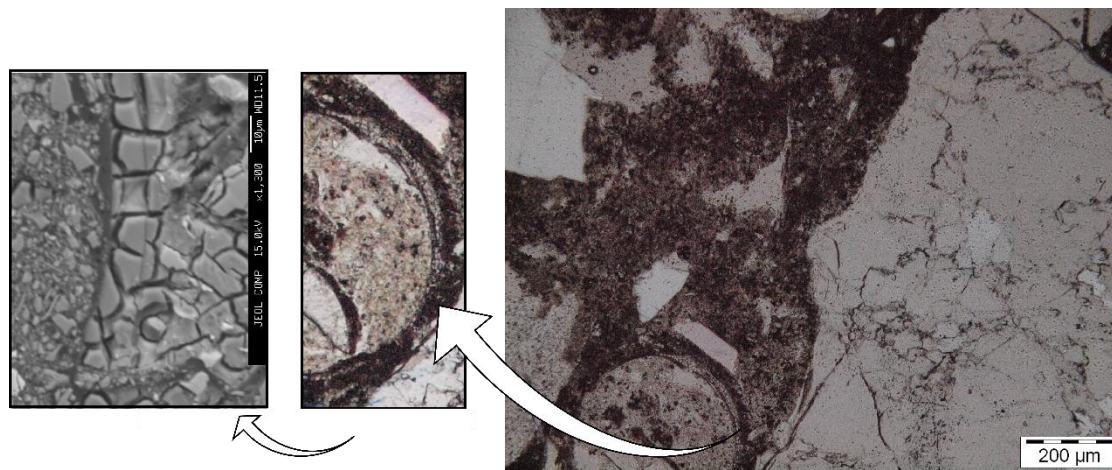


Figura 4.35 - Localização das análises no gel sílico-alcálico em imagem obtida com MEV e ao microscópio ótico (N//).

4.4. Resultados do ataque alcalino

Antes da realização do ensaio, procedeu-se ao estudo em amostra de mão e à lupa binocular dos cristais de feldspato.

Os cristais de feldspato de granito são (não alterado), em amostra de mão e à lupa binocular, apresentavam-se com cor branca e refletindo bastante a luz, bem como possuíam inclusões de biotite pontuais. Os cristais de feldspato alterados apresentavam-se, no entanto, mais amarelados e fraturados.

Após os 18 dias em que decorreu o ensaio, mantendo-se uma temperatura constante de 38 °C, foi possível observar ligeiras diferenças nos feldspatos em relação ao que foi inicialmente

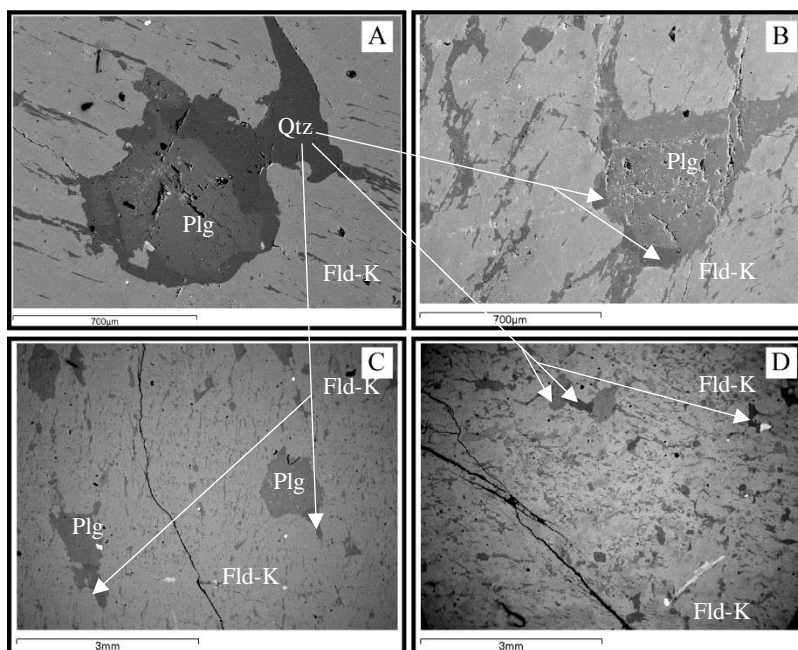


Figura 4.36 - A) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito são e não sujeito a ataque; B) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito são e sujeito a ataque; C) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito alterado e não sujeito a ataque; D) Fotografia de quartzo de pequenas dimensões no feldspato de granito alterado e sujeito a ataque.

registado. A comparação das fotografias obtidas à lupa, antes e após o ensaio, permitiu verificar que após a realização do ensaio os cristais mostravam fraturas mais nítidas, sugerindo a possibilidade de poderem estar ligeiramente mais afetados pela exposição à solução alcalina.

O estudo ao microscópio ótico de lâminas delgadas de granito são e alterado permitiu identificar grandes diferenças entre os cristais provenientes das duas lajes graníticas. Os cristais de feldspato-K mostravam-se bastante pertíticos e a plagioclase, no granito são e no granito alterado, evidenciava algum zonamento. Eram também visíveis, nos megacristais de feldspato-K, redes de fracturação e algumas inclusões de cristais subédricos de biotite e plagioclase. No entanto, tais aspetos apresentavam-se mais marcados nos feldspatos do granito alterado, devido à alteração natural sofrida pela rocha, apresentando zonas muito fraturadas ou onde apenas eram visíveis produtos da alteração. Os limites dos cristais de feldspato-K e de plagioclase encontravam-se serrilhados.

A análise química quantitativa à EPMA de cristais destas lâminas delgadas permitiu concluir que todos os cristais de plagioclase apresentavam zonamento químico, o qual era quase inexistente nos cristais de feldspato-K.

Os cristais de feldspato obtidos das lajes de granito também foram analisados ao MEV após realização do ensaio com o objetivo de investigar a existência de variações químicas nos feldspatos atacados por hidróxido de sódio comparativamente aos feldspatos que não sofreram esse ataque (Anexo 8). No entanto, só foi possível realizar análises semiquantitativas pois, após o ataque químico, a superfície dos cristais apresentava uma certa rugosidade, provavelmente originada pelo ataque que estes experimentaram ao estarem imersos na solução. A análise semiquantitativa confirmou que os megacristais de feldspato decimétricos, que ao microscópio ótico apresentavam pertites, inclusões de plagioclase e biotite, eram de feldspato-K. Contudo através da observação ao MEV foi possível também observar a existência de quartzo de pequenas dimensões (Figura 4.36), o que não tinha sido detetado ao microscópio ótico. Este quartzo

encontrava-se geralmente associado às inclusões de plagioclase e a micas de maiores dimensões no seio do megacristal de feldspato-K.

Realizaram-se análises químicas semiquantitativas (EDS) em feldspatos-K e plagioclases, junto a fraturas e afastadas destas, de forma a estudar a influência destas descontinuidades na composição química dos cristais referidos. Os resultados obtidos mostram que não existem alterações nas quatro amostras, apresentando composições muito semelhantes próximo e longe das fraturas em feldspatos, quer estes se apresentassem são ou alterados ou mesmo no caso de terem ou não sofrido ataque químico por hidróxido de sódio.

A amostra de feldspato proveniente do granito são que não sofreu ataque químico apresentava superfície lisa, com poucas fraturas e sem variações composicionais no feldspato-K. O cristal que esteve exposto ao hidróxido de sódio, proveniente da mesma laje de granito, era semelhante a este último, contudo a sua superfície encontrava rugosa.

O feldspato do granito alterado que não foi imerso na solução de NaOH apresentava indícios da alteração natural a que a rocha foi sujeita. A rede de fracturação era bastante mais intensa e minerais como a biotite apresentavam alteração para clorite. Este cristal, tal como foi descrito para o caso anterior, apresentava indícios de ataques à superfície causados pela alteração natural da rocha, sendo visíveis indícios deste processo mesmo após o polimento da amostra.

O cristal proveniente da laje granítica alterada e que foi sujeito a ataque químico apresentava superfície rugosa, à semelhança do caso anterior, embora neste caso fosse evidente um maior ataque/alteração. Através das imagens obtidas ao MEV foi possível verificar que o feldspato-K apresentava zonamentos químicos, bem evidentes nos diferentes tons de cinza observados nas referidas imagens (Figura 4.37). Contudo tal facto não foi detetado através de análises químicas semiquantitativas (EDS). Tal poderá dever-se a pequenas mudanças composicionais em álcalis, em resposta ao ataque da solução de hidróxido de sódio, relativamente a um feldspato já por si deteriorado pela alteração. Não se obtiveram análises à EPMA uma vez que estas pequenas mudanças só foram observáveis nas amostras que foram colocadas em NaOH e cuja superfície irregular não permita leituras rigorosas.

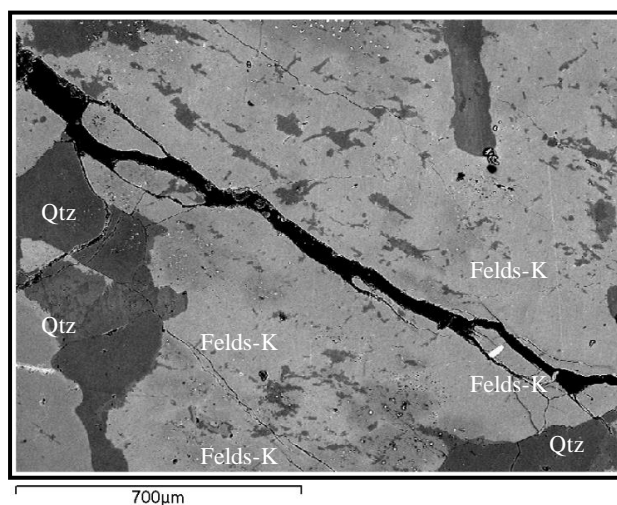


Figura 4.37 - Feldspatos com zonamento químicos (Fotografia ao MEV)

5. Discussão

Não existe, na atualidade, um método de ensaio fiável que possa ser aplicado aos agregados de forma a determinar se estes poderão vir a revelar-se reativos quando utilizados em betão. Assiste-se, em diversos laboratórios de diferentes países, a um esforço para harmonizar e uniformizar as metodologias empregues na caracterização da reatividade aos álcalis dos agregados para betão.

Em Portugal, tal como nos outros países, verifica-se que o número de casos de estruturas afetadas por reações químicas expansivas de origem interna está a aumentar, nomeadamente por RAS. Este tipo de reações apresenta diferentes obstáculos à sua resolução, uma vez que os mecanismos envolvidos na deterioração das estruturas de betão ainda não são totalmente compreendidos. Para além de que, até à data, não existe nenhum método que tenha mostrado eficaz na reparação das estruturas degradadas por RAS.

Torna-se assim necessário entender como essas reações se desenvolvem e identificar os fatores determinantes para a ocorrência das mesmas, de forma a encontrar métodos preventivos que possibilitem a sua inibição em futuras construções.

Saliente-se que as rochas graníticas são amplamente aplicadas como agregados em betão no nosso país, nomeadamente nas zonas norte e centro, e, na sua maioria, os agregados delas derivados são classificados como de reatividade lenta. Constata-se ainda que diversas estruturas onde os agregados graníticos foram aplicados mostram, em geral, ao fim de algumas décadas, indícios de RAS.

Em complemento à ocorrência de quartzo microcristalino e/ou deformado, os granitos podem contribuir para a ocorrência de RAS libertando álcalis para a solução intersticial do betão. Este aspeto é o principal objetivo do presente trabalho, tendo-se utilizado diferentes ensaios para avaliar a potencial libertação de álcalis.

5.1. Análise química de rocha total

A análise química de rocha total permitiu determinar quais os agregados mais ricos em álcalis.

Este parâmetro é importante na medida em que é esperado que os agregados que apresentem maiores teores em álcalis sejam aqueles onde também se verifique uma maior libertação desses catiões, se não levarmos em conta certas características como a alteração, rede de fraturação, granularidade, entre outras.

Os resultados obtidos a partir da análise química de rocha total permitiram a definição de uma sequência de agregados, expressa na Figura 5.1, onde estes foram ordenados de acordo com o seu teor em álcalis (Tabela 4.1).

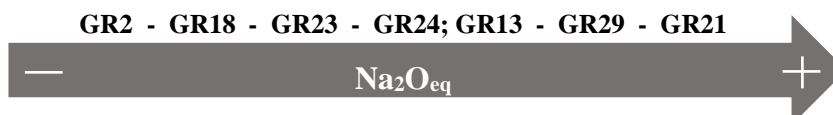


Figura 5.1 - Sequência de agregados ordenados por grau crescente do conteúdo em álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) obtido por análise química de rocha total (valores expressos na Tabela 4.1)

Da análise dos resultados destaca-se que os agregados GR2 e GR18 são aqueles que apresentam um teor mais baixo em álcalis, enquanto os agregados GR29 e GR21 registam os valores mais elevados. Os agregados GR23, GR24 e GR13 apresentam teores em álcalis intermédios, relativamente aos agregados referidos (Figura 5.1; Tabela 4.1).

É importante salientar que os agregados que registam maiores valores de teor de álcalis são os que, em princípio, contêm mais Na e K para libertar e, assim, promoverem o desenvolvimento de RAS. No entanto, esta capacidade de libertação de álcalis depende do tipo de feldspato presente.

Nas partículas de agregado os valores de potássio obtidos eram, em geral, superiores aos de sódio, mostrando que os granitos continham maiores quantidades de K do que Na.

É de notar que foram selecionados para a análise química blocos de rocha sã de cada agregado.

5.2. Petrografia e análise de imagem

A maioria das normas, a nível mundial, consideram que a utilização da petrografia permite, desde logo, efetuar uma pré-seleção de agregados potencialmente reativos, sendo este método frequentemente utilizado antes de qualquer outro ensaio. Através da análise petrográfica podemos obter informações importantes: qualitativas, relativamente à reatividade dos agregados, e à quantidade de álcalis que estes poderão vir a libertar. Verifica-se a presença de quartzo microcristalino, a intensidade da rede de fracturação, a presença de minerais potencialmente fornecedores de álcalis, como os feldspatos e as micas, bem como o seu estado de alteração. Estes fatores são defendidos na literatura especializada como sendo os principais aspetos visuais a ter em conta para se determinar a reatividade de um agregado. No entanto convém salientar que a petrografia, por si só, é por vezes insuficiente para justificar o comportamento de alguns agregados em obra.

Neste trabalho, os estudos de petrografia realizados permitiram identificar as amostras de agregados que possuíam maior probabilidade de libertar álcalis e, assim, poderem contribuir para a RAS. A descrição petrográfica dos agregados consistiu na identificação dos tipos de feldspatos neles presentes e na análise qualitativa das características anteriormente referidas.

A partir da análise petrográfica qualitativa realizada neste trabalho, tendo em conta a definição dos agregados que apresentavam maior número de características de alteração e a intensidade com que estas apareciam, definiu-se uma sequência que foram ordenados de acordo com a probabilidade de libertação de álcalis (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de grau de alteração, obtida através da análise petrográfica.

Assim, os agregados GR18 e GR21 foram classificados como aqueles que apresentam indícios de uma alteração mais intensa (Figura 5.2).

Os agregados GR24, GR23 e GR29, embora apresentassem menos indícios, ou uma alteração de menor intensidade, encontrar-se-iam em posições intermédias na escala de alteração.

Verifica-se que nos agregados GR2 e GR13 essa alteração não é tão intensa, comparativamente aos outros agregados (Figura 5.2).

A sequência apresentada, quanto ao grau de alteração, permite tecer algumas considerações adicionais:

- Os agregados mais alterados e fraturados são mais facilmente atacados pela solução intersticial do betão e libertam mais álcalis;

- Devido aos processos de alteração natural, estes agregados dispõem de menor teor em álcalis e, assim, menor potencial para colocar Na^+ e K^+ nas soluções intersticiais. Este aspeto foi esclarecido pelos ensaios realizados como a seguir se indica.

A análise petrográfica realizada permitiu ainda verificar que agregados com maiores indícios de deformação eram também os mais alterados.

Neste trabalho também se procedeu ao estudo dos diferentes agregados através da análise de imagem, tendo-se conseguido visualizar a alteração de minerais específicos e a rede de fracturação das amostras.

Convém referir que a utilização da análise de imagem assume uma grande relevância se pensarmos que permite obter dados/informações que não são influenciados pela experiência e/ou qualidade do observador, apenas tendo influência o tipo de filtros ou as operações utilizadas. Este método apresenta-se assim com grande confiança pois aumenta a fiabilidade dos resultados obtidos já que estes não são afetados por fatores subjetivos inerentes ao operador.

De forma a comparar a alteração que os diferentes agregados apresentavam, tal como referido anteriormente, estes foram divididos em três classes considerando os valores de alteração obtidos para $\frac{3}{4}$ das áreas analisadas:

- Classe 1: Cristais que apresentem $\frac{3}{4}$ dos valores compreendidos entre 0 a 30 % de área alterada;
- Classe 2: Cristais que apresentem $\frac{3}{4}$ dos valores compreendidos entre 31 a 50 % de área alterada;
- Classe 3: Cristais que apresentem $\frac{3}{4}$ dos valores acima de 50 %.

Para se obter uma classificação mais pormenorizada, subdividiram-se as primeiras duas classes de acordo com os seguintes critérios:

- Subclasse a: cristais que apresentam $\frac{3}{4}$ dos valores compreendidos entre 0 a 10 % de área alterada no caso da classe 1 e 31 a 40 % na classe 2;
- Subclasse b: cristais que apresentam $\frac{3}{4}$ dos valores compreendidos entre 11 a 20 % de área alterada no caso da classe 1 e 41 a 50 % na classe 2;
- Subclasse c: cristais que apresentam $\frac{3}{4}$ dos valores compreendidos entre 21 a 30 % de área alterada na classe 1.

No anexo 9 encontra-se um esquema resumo da classificação proposta para os cristais de feldspato numa fração.

A classificação dos agregados, tendo por base a percentagem da área alterada que os cristais de plagioclase e feldspatos-K apresentavam, encontra-se resumida na Tabela 5.1.

A análise dos resultados descritos na tabela referida permitiu definir quatro categorias para a alteração tendo em conta as classes obtidas anteriormente para os dois tipos de feldspatos de cada agregado:

- Classe de menor alteração: ambas as frações apresentam graus de alteração dos dois tipos de feldspatos da classe 1, embora a fração alterada possa apresentar um subgrupo de maior intensidade;
- Classe de alteração intermédia inferior: as frações apresentam um tipo de feldspato de grau de alteração 2, podendo mostrar classes inferiores para algumas frações;
- Classe de alteração intermédia superior: as frações apresentam mais de um tipo de feldspato de graus de alteração 2;
- Classe de maior alteração: as frações apresentam valores de alteração na classe 3, contudo isto não impossibilita que algumas frações pertencentes às classes 1 e 2.

No anexo 10 encontra-se um esquema resumo da classificação proposta para cada tipo de agregado a partir das obtidas para os respetivos cristais de feldspato de cada fração.

A partir dos dados expressos na Tabela 5.1 podemos concluir que o agregado que se integra na classe de menor alteração é o agregado GR2, que corresponde a um granito deformado.

Tabela 5.1 - Classificação das diferentes frações dos agregados estudados tendo em conta a alteração dos feldspatos-K e das plagioclases

Agregado	GR2		GR13		GR18			GR21			GR23		GR24		GR29	
Fração	N	A	N	A	N	V	A	N	V	A	N	A	N	A	N	A
Feldspato-K	1a	1b	1b	1b	1b	1b	1b	1b	3	3	1b	1c	2a	2a	2a	2a
Plagioclase	1b	1b	2a	2b	2a	3	3	1b	3	3	1c	2a	2a	2a	2a	2b

Os agregados GR13 e GR23 enquadram-se na classe de alteração intermédia, sendo que o agregado GR13 é aquele que, de entre os dois, exibe maior número de frações com subclasses de maior grau de alteração.

Os agregados GR24 e GR29, ao apresentarem mais de uma fração de classe 2, incluem-se na classe de alteração intermédia superior, embora seja o agregado GR24 aquele que mostra maior número de indícios deste fenómeno, especialmente nas suas plagioclases.

Os agregados GR18 e GR21 incluem-se na última categoria, a classe de maior alteração, apresentando-se o agregado GR21 com mais frações de alteração elevada.

Pode-se assim proceder a uma seriação dos diferentes agregados estudados, da menor para a maior alteração, tal como se observa na Figura 5.3:

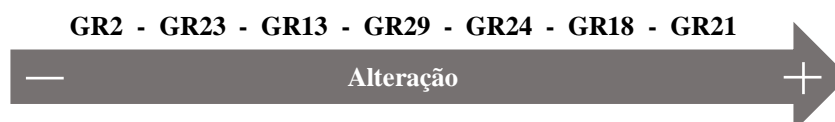


Figura 5.3 - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de grau de alteração, obtida através da análise de imagem.

Verifica-se que os agregados que foram identificados, através da análise petrográfica (GR18, GR21), por apresentarem um maior número de características de alteração são também aqueles que agora, através da análise de imagem, são classificados em classes de maior alteração.

Esta concordância de resultados assume grande relevância pois acaba por validar/confirmar a técnica agora utilizada, a análise de imagem, com a grande vantagem de, através desta última, se poder estabelecer uma classificação quantitativa dos agregados quanto à alteração.

Também foi possível verificar que, no geral, os agregados apresentavam maior alteração dos cristais de plagioclase comparativamente aos feldspato-K. Este facto já era observável através do estudo petrográfico, mas a utilização da análise de imagem permitiu quantificar a alteração dos dois minerais, sendo assim possível fazer-se uma distinção da alteração, em termos quantitativos, dos dois tipos de feldspato.

Estudos anteriores não encontraram relação entre a deformação de cada granito estudado neste trabalho com a libertação de álcalis ou reatividade que poderiam vir a registar quando aplicados em betão como agregado.

5.3. Ensaio AAR-8

O ensaio AAR-8 é um método que tem vindo a ser defendido em alguns países como crucial para a identificação de agregados de reação lenta que poderão libertar álcalis, uma vez que simula as condições de pH e temperatura do betão ao longo do tempo.

Saliente-se, porém, que este ensaio é bastante moroso, terminando apenas um ano após o seu início, se ocorrer estabilização da libertação de álcalis, ou mesmo podendo ser alargado se não ocorrer essa estabilização.

Na Tabela 5.2 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos através dos ensaios AAR-8, encontrando-se os agregados estudados ordenados de acordo com a libertação de álcalis.

Tabela 5.2 - Sequência comparativa das diferentes frações dos agregados estudados relativamente à libertação de K_2O , Na_2O e Na_2O_{eq} (valores finais).

Valores	K_2O	Na_2O	Na_2O_{eq}
	GR18-A	GR23-A	GR23-A
	GR2-A	GR24-A	GR2-A
	GR18-V	GR21-V	GR13-A
	GR13-A	GR13-A	GR29-A
	GR18-N	GR29-A	GR18-A
	GR23-A	GR21-A	GR18-V
	GR29-A	GR21-N	GR24-A
	GR29-N	GR24-N	GR21-N
	GR21-N	GR2-A	GR21-A
	GR2-N	GR13-N	GR21-V
	GR24-A	GR18-V	GR18-N
	GR21-A	GR18-A	GR13-N
	GR21-V	GR23-N	GR29-N
	GR13-N	GR2-N	GR24-N
	GR23-N	GR29-N	GR24-N
	GR24-N	GR18-N	GR23-N

Relativamente à libertação de sódio e de potássio, os dados obtidos para as partículas de agregado estudadas mostram que estas podem apresentar diferentes solubilidades para cada álcali. Existe, contudo, uma tendência geral para os agregados das frações alteradas apresentarem menores valores de libertação de álcalis do que os das frações não alteradas. Como já referido anteriormente, tal deve-se ao facto de os minerais portadores de álcalis, encontrando-se já alterados, apresentarem menor quantidade de sódio e de potássio disponíveis na sua composição o que, consequentemente, leva a uma menor libertação desses cationes no decurso do ensaio.

A análise dos resultados permite concluir que os agregados estudados apresentam valores de libertação de potássio superiores aos de sódio, o que pode dever-se a uma maior intensidade de alteração das plagioclases, o que foi comprovado pela análise petrográfica, bem como pelo facto de existir devido à maior percentagem modal de cristais de feldspato-K relativamente aos de plagioclase.

No ensaio AAR-8 foi realizado o cálculo da libertação de álcalis por fração, enquanto nos outros ensaios e análises se procedeu ao estudo dos agregados no seu todo.

Constatando-se que nas obras de engenharia/construções de betão se utilizam agregados com as diferentes frações, tentou-se também calcular a média ponderada de libertação de álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) por agregado, para, desta forma, se definir quais os agregados que globalmente apresentavam maiores libertações de álcalis.

Na Tabela 5.3 encontram-se os valores obtidos, para os agregados estudados, relativos à libertação e teor em álcalis assim como relativamente à alteração.

Tabela 5.3 - Valores de alteração (em %; análise de imagem), de libertação em % (ensaio AAR-8) e em % para análise química de rocha total de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$.

Agregado	Alteração (média)	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (AAR-8)	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (análise química global)
GR2	12,25	0,1195	5,72
GR13	31,25	0,1050	6,40
GR18	35,67	0,1080	6,01
GR21	45,83	0,1146	6,82
GR23	22,75	0,1215	6,26
GR24	33,50	0,1125	6,40
GR29	35,50	0,1130	6,58

Convém referir que o $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ obtido através do ensaio AAR-8 (Tabela 5.3) representa o total de álcalis libertados, ou seja, o somatório dos valores registados para o potássio e o sódio tendo em conta as suas respectivas massas atómicas. Estes valores representam a média ponderada entre os obtidos para $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ de todas as frações de cada agregado tendo em conta a percentagem de material alterado e são provenientes de cada pedreira. O valor de alteração da Tabela 5.3 refere-se à média das medianas obtidas através da análise de imagem das distintas frações descritas anteriormente para cada agregado. O valor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ obtido através da análise química total de rocha refere-se ao valor obtido neste mesmo ensaio.

De acordo com libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, procedeu-se a uma seriação dos diferentes agregados estudados, estando estes ordenados por grau crescente de teor em álcalis obtido no ensaio AAR-8 (Figura 5.4).

Podemos concluir que o agregado GR2 é, de entre os estudados, aquele que, à semelhança do GR23, tem um dos maiores valores de libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ e, por isso, um dos que se mostra mais passível de contribuir para a ocorrência de RAS (Tabela 5.3; Figura 5.4). Este comportamento pode ser explicado pelo baixo número de indícios de alteração que as partículas do GR2 apresentam, traduzido no valor obtido pela análise de imagem. Esta característica contribui para a forte libertação de álcalis por parte deste agregado comparativamente com os restantes. Contudo, o GR2 regista o valor mais baixo de entre os agregados estudados para o teor em álcalis, como se comprova pela análise química de rocha total, sendo, à partida o que possuiria menor quantidade de álcalis para libertar. Uma situação semelhante é a que acontece com o agregado GR23.

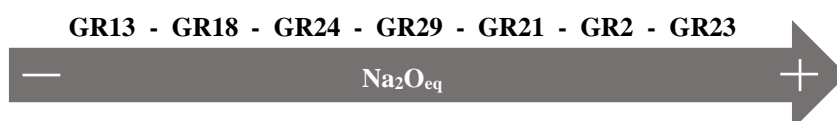


Figura 5.4 - Sequência de agregados ordenados por grau crescente de conteúdo em álcalis ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) obtido através do ensaio AAR-8.

O agregado GR13, de entre os agregados estudados, é aquele que regista os menores valores de libertação de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. No entanto, nas sequências de alteração e de análise química de rocha total (Figuras 5.2 e 5.3 respetivamente) este agregado apresenta valores intermédios comparativamente aos restantes agregados. O agregado GR24 evidencia comportamentos semelhantes ao GR13, embora ostente maiores valores de libertação de álcalis no ensaio AAR-8, registando-se apenas teores em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ e indícios de alteração ligeiramente superiores aos obtidos para o agregado GR13.

Os agregados GR21 e GR18 apresentam valores de alteração elevados (Figura 5.2). No entanto, as partículas do agregado GR21, na análise química de rocha total e no ensaio de libertação de álcalis, registaram valores bastante superiores aos do agregado GR18 (Tabela 5.3). Estes agregados, embora apresentem valores elevados de alteração, não registam os valores mais baixos de libertação de álcalis. Tal deve-se ao elevado teor em álcalis que apresentam na análise química de rocha total. O agregado GR29 mostra características semelhantes ao agregado GR21 nos diferentes ensaios.

Os resultados expressos na Tabela 5.3 para o ensaio AAR-8 demonstram que a libertação de álcalis por parte de um agregado não é inteiramente dependente da quantidade de álcalis que este possui na sua composição ou da alteração das partículas de agregado. Neste trabalho, constatámos que os valores obtidos nos distintos ensaios se encontravam relacionados, à exceção dos verificados para o agregado GR2 e GR23. Estes demonstram valores de libertação de álcalis elevados, dentro dos agregados estudados, embora registem valores de alteração inferiores aos restantes agregados. Contudo, a análise química de rocha total mostra que são os que apresentam quantidades destes catiões inferiores aos dos outros agregados. Tal indica que outros fatores poderão concorrer para a libertação de álcalis por parte de um agregado e que esta não depende apenas do teor em álcalis ou da alteração e deformação que a rocha apresenta, sendo necessário ponderar como diferentes gerações de feldspatos ou distintos minerais, como as micas, poderão condicionar a libertação de álcalis por parte de um agregado.

A alteração é um processo que provoca a remoção de iões alcalinos em minerais como os feldspatos, os principais portadores de álcalis em granitos. Assim sendo, é de esperar que partículas de granito alterado apresentem uma menor libertação de álcalis do que as compostas por granito são, não tendo estas últimas sofrido qualquer processo de lixiviação natural.

É de salientar, que, num cristal alterado, existe uma rede de fracturação mais intensa que a observada em partículas de rocha sã, possuindo, assim, maior superfície específica. Este facto poderá contribuir para a lixiviação de álcalis nestas partículas de granito permitindo uma eficaz progressão das reações, ao invés do que acontece nas partículas sãs.

É importante salientar que os agregados aplicados em construção não apresentam a granulometria utilizada (150 μm) na investigação realizada, tendo sido especificamente aplicado esta dimensão no ensaio AAR-8 para aumentar a rapidez das reações a estudar. A diminuição de granulometria, utilizada para a realização do ensaio, poderá gerar diferenças na libertação de álcalis que não seriam observáveis em outras dimensões.

Tal como já foi referido anteriormente, a análise petrográfica possibilita a obtenção de informação adicional que permite comprovar os resultados obtidos nestes ensaios. Através dela é possível confirmar os feldspatos predominantes numa amostra e determinar o seu grau de alteração, bem como a existência ou não de mais de uma geração de cada feldspato.

Contudo, se compararmos os valores obtidos para as plagioclases e os feldspatos-K, separadamente, com os registados para a libertação de Na_2O e K_2O , respetivamente, não é possível encontrar uma correlação direta entre eles. Tal pode ser influenciado pela não distinção entre os diferentes feldspatos na análise de imagem, uma vez que as diferentes gerações do mesmo tipo de feldspato não foram separadas, bem como as gerações de granularidade distinta, o que poderá influenciar a libertação dos álcalis. Assim, estes três

métodos surgem como complementares uns dos outros, uma vez que avaliam parâmetros diferentes e, no conjunto, permitem obter informações relevantes sobre a reatividade dos agregados relativamente aos álcalis.

5.4. Gel Pat Test

O ensaio Gel Pat Test é realizado com o intuito de determinar a suscetibilidade de um agregado em formar gel sílico-alcálico e consiste, tal como já referido, na imersão de prismas de betão, previamente polidos, numa solução de NaOH a 1M.

Neste ensaio os prismas de betão expostos à solução alcalina mostraram, no final do ensaio, indícios de carbonatação. As amostras apresentavam uma pasta de cimento clara carbonatada (PC) para além da pasta usual de coloração cinza (PE), com composição química distinta e em que a pasta clara apresenta incrementos em cálcio e ferro.

Verificou-se que a carbonatação se desenvolvia em frentes de reação para outras áreas da pasta de cimento a partir de zonas onde era mais intensa. A PC era mais expressiva junto a partículas de agregado que apresentavam determinadas características, como:

- Abundância de feldspato;
- Rede de fraturação intensa;
- Sem indícios alteração/meteorização elevados.

Os feldspatos da lâmina de uma das amostras utilizadas no ensaio Gel Pat Test foram analisados à EPMA. Estes minerais mostravam zonamentos químicos quando se encontravam perto dos bordos dos agregados, apresentando composições químicas mais pobres em álcalis perto da interface com a pasta de cimento. Os cristais que foram observados no interior dos agregados não registavam estas diferenças composicionais.

Com a ressalva de que as análises à microsonda realizadas na pasta de cimento não são muito exatas, devido ao imperfeito polimento nesta zona, a partir das análises de EPMA realizadas tanto na PC como na PE calcularam-se as razões $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/(\text{Si}/\text{Ca})$ e $(\text{Al}/\text{Ca})/(\text{Si}/\text{Ca})$ que posteriormente foram projetadas nos gráficos das Figuras 5.5 e 5.6.

A análise do gráfico da Figura 5.5, onde se encontram projetados os valores da razão $(\text{Al}/\text{Ca})/(\text{Si}/\text{Ca})$, permite comparar as composições químicas das pastas de cimento analisadas com a composição química estipulada para CSH, em que $\text{Al}/\text{Ca} \sim 0,1$ e $\text{Si}/\text{Ca} \sim 0,55$, representada a preto no referido gráfico.

Constata-se que os valores correspondentes à pasta de cimento escura (PE) apresentam composição química mais próxima de CSH, do que a PC. Tendo em conta que os elementos estariam igualmente distribuídos antes do ensaio, constata-se que a pasta escura tem mais alumínio e silício que a PC. Este enriquecimento deve provir de minerais das partículas de agregado, possivelmente dos feldspatos e das micas, no caso do Al, e do quartzo, para o Si presente no granito.

Contudo, a PC também apresenta alguns valores semelhantes aos estabelecidos para CSH, demonstrando que não existe um limite bem definido entre os dois tipos de pasta, podendo existir porções de PE no domínio da PC, tal como referido anteriormente. É, no entanto, possível delimitar áreas, no gráfico da Figura 44, onde as composições químicas são características de apenas um tipo de pasta de cimento.

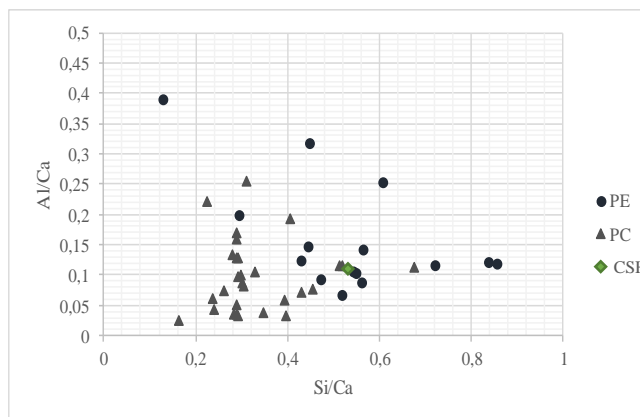


Figura 5.5 - Gráfico relativo às razões Al/Ca e Si/Ca das diferentes pastas de cimento obtidas no ensaio Gel Pat Test

No gráfico da Figura 5.6 encontram-se projetados os valores da razão $Na_2O_{eq}/(Si/Ca)$ obtidos para as duas pastas de cimento, PE e PC.

Como se pode verificar ocorre um ligeiro empobrecimento em álcalis e sílica e enriquecimento em cálcio da pasta escura para a pasta mais clara. Isto é, as reações químicas que ocorreram durante o ensaio remobilizaram estes elementos, concentrando-os mais num dos tipos de pasta.

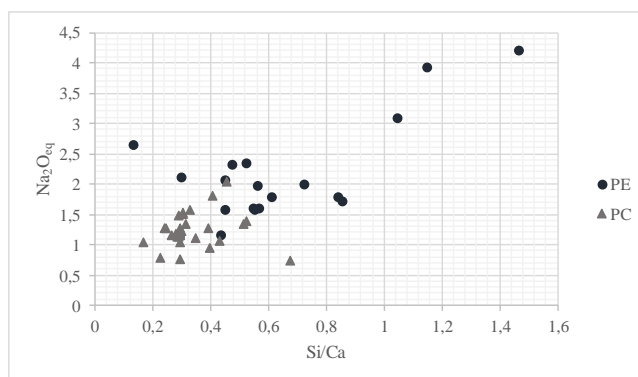


Figura 5.6 - Gráfico relativo às razões Na_2O_{eq} e Si/Ca das diferentes pastas de cimento obtidas no ensaio Gel Pat Test.

A pasta PC mostra um enriquecimento em Ca indicando a ocorrência de carbonatação, tal como referido anteriormente. Os valores de sílica e de álcalis obtidos para este tipo de pasta são bastante baixos comparativamente aos de PE, ou mesmo aos correspondentes a CSH. Tal deve-se ao facto de os álcalis serem bastante móveis e, por isso, à medida que as reações se foram desenvolvendo, estes poderão ter migrado para outras áreas da amostra, mais especificamente para a PE. Deste modo, aumentar-se-ia a porosidade nas zonas onde ocorre a PC, levando a um incremento da concentração do CO_2 , o que provocaria a precipitação de carbonatos. Assim, as reações observadas teriam início junto a partículas de agregados que apresentariam feldspatos nos seus bordos.

É de notar que nas amostras de granito não alterado a libertação de álcalis é mais elevada durante os ensaios AAR-8, o que parece estar em consonância com a reação observada neste ensaio, uma vez que aí os feldspatos registavam maiores mudanças composicionais e a formação de PC era mais intensa.

O ensaio em questão, o Gel Pat Test, parece ser insuficiente para comprovar que um agregado de reação lenta poderá contribuir para a formação de gel sílico-alcálico quando aplicado em betão. As partículas estudadas pertenciam a agregados que se sabia previamente serem de reação lenta. No final deste ensaio

não foi possível observar indícios da formação de gel, à exceção de uma pequena porção que se encontrava num poro de pequenas dimensões. Os resultados agora obtidos indicam que o ensaio, tal como é realizado atualmente, não é o mais adequado para este tipo de agregados.

5.6. Ataque químico a feldspatos

A realização do ataque químico a feldspatos é um ensaio que pretende determinar o comportamento dos feldspatos quando sujeitos a uma solução rica em álcalis e de pH elevado. Este ensaio não se encontra nas normas internacionais ou nacionais, por ser bastante recente, carecendo ainda de manter desenvolvimento.

Os feldspatos que foram expostos às soluções alcalinas não apresentaram diferenças significativas entre si nem em relação aos que não haviam sofrido esse processo. Contudo, a amostra alterada que esteve sujeita a NaOH demonstrava pequenas mudanças composicionais que não eram detetáveis através da análise semiquantitativa, sendo apenas visíveis ténues mudanças de tonalidade nas imagens obtidas através do MEV em áreas que poderiam ser mais ricas em K^+ . Seria, no entanto, necessário averiguar este resultado através de análises quantitativas, de forma a determinar as diferenças composicionais exatas.

Partindo dos resultados deste ensaio, apenas se pode concluir que ambos os feldspatos são atacados pelas soluções, facto perceptível através de uma certa perda de brilho e o aumento da rugosidade das suas superfícies. Verifica-se ainda que o ataque é mais intenso nos feldspatos que já possuíam indícios de alteração natural antes da realização deste ensaio.

O estudo do ataque químico foi complementado com análises ao MEV/EDS. Esta análise permitiu determinar a existência de quartzo de pequenas dimensões cuja ocorrência não tinha sido detetada. Este quartzo encontrava-se preferencialmente junto a plagioclases e micas e preenchendo também pequenas fraturas.

A presença deste quartzo assume relevância, apesar da sua pequena expressividade, tendo em conta que se trata de uma das formas de sílica consideradas potencialmente reativas, indo também conferir uma maior reatividade ao granito, apenas verificável ao MEV. Assim, torna-se um aspeto a ter em consideração para avaliar a reatividade de um agregado.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Todos os ensaios empregues mostram que os agregados provenientes de rochas graníticas podem contribuir com álcalis para a solução intersticial do betão. A lixiviação de álcalis destas partículas aumenta a probabilidade de se desenvolverem RAS, dando origem à formação de produtos de reação expansivos.

Neste trabalho a análise química de rocha total permitiu determinar quais os granitos que apresentam maior teor em álcalis e, assim, os que em princípio mais contribuiriam para o desenvolvimento de RAS. Contudo, verificou-se que nem sempre as partículas de agregado que apresentavam maiores teores de álcalis são as que registaram maiores valores de libertação (ensaio AAR-8), demonstrando que outros fatores também estarão envolvidos no processo.

A análise petrográfica permitiu verificar que as frações mais deformadas são as que apresentam um maior número de indícios de alteração, ou seja, a fraturação causada pela deformação poderá ter permitido o avanço dos agentes de alteração. Os resultados da análise petrográfica confirmam que esta deve ser considerada como um método obrigatório para a caracterização de um agregado, possibilitando a atribuição de uma classificação quanto à reatividade potencial e à possibilidade de libertação de álcalis pelas partículas de agregado. Os agregados compostos por granito alterado são geralmente considerados como capazes de libertar maiores quantidades de álcalis comparativamente com os compostos por rocha sã. Este estudo, no entanto, prova o contrário. Verificou-se que os granitos não alterados apresentaram capacidade de libertação de álcalis superior à registada para os granitos com maiores indícios de alteração. Outro fator a ter em consideração no futuro será o tipo de alteração ou de deformação a que a rocha possa ter sido submetida. Estes processos atuam na rocha podendo aumentar a superfície específica através de fraturas ou, como no caso da alteração, diminuir a quantidade e o tipo de álcalis presentes em minerais específicos, como os feldspatos-K e/ou plagioclases, através de processos de lixiviação. Embora em termos químicos a alteração de partículas de agregado de rochas graníticas se verifique vantajosa na aplicação em betão, em termos mecânicos esta não será a solução mais adequada pois penaliza as propriedades físicas do mesmo. Assim, propõe-se que o estudo destas matérias (química/mecânica) seja mais aprofundado, de forma a determinar que graus e que tipos de alteração da rocha granítica poderão ser os mais adequados para a utilização em betão, sem que se comprometa a sua durabilidade mecânica.

Os resultados obtidos no ensaio AAR-8 até ao momento mostram que algumas frações dos agregados estudados ainda registam libertação de álcalis, pelo que seria necessário prolongar o ensaio a fim de determinar se as conclusões retiradas se confirmam ou se há estabilização. Com estes ensaios demonstrou-se que será necessário rever as características petrográficas relevantes para a libertação de álcalis, nomeadamente no que respeita à alteração e à fraturação. Salienta-se que o ensaio AAR-8 permitiu confirmar as conclusões obtidas, quer através da análise de imagem quer com a análise química de rocha total, fundamentando a afirmação de que estas técnicas poderiam vir a constituir-se como uma ferramenta importante na classificação da alteração dos agregados graníticos. Contudo é necessário realizar mais ensaios de forma a determinar que características e a forma como estas influenciam a libertação de álcalis por parte de um agregado para além da análise de imagem e da análise química de rocha total, que quantificam a alteração e o teor de um agregado em álcalis, respetivamente.

A análise de imagem permitiu quantificar a alteração observada através da petrografia. Contudo, será necessário realizar com mais detalhe estudos nesta área de forma a confirmar os resultados obtidos, uma vez que este método foi empregue apenas em 11 cristais de feldspato-K e em outros 11 cristais de plagioclase, de cada fração. O número de amostras agora estudadas poderá ser insuficiente para uma representação fiel da totalidade das partículas dos agregados de uma pedreira, pois poder-se-á supor que esta tem zonas com diferentes graus de alteração, carecendo assim de um estudo mais sistemático e em diferentes áreas da pedreira.

Num estudo deste tipo seria importante ter em consideração as diferentes gerações do mesmo mineral que possam ocorrer, uma vez que estas poderão apresentar características de granularidade e de graus de alteração diferentes, o que poderá influenciar a libertação de álcalis. Seria também interessante aplicar posteriormente a análise de imagem na quantificação de cada mineral na amostra, bem como verificar os graus de alteração que cada um apresenta. Assim, seria possível obter informações complementares à contagem de pontos, necessariamente mais lenta do que a análise de imagem.

A análise de imagem, que até ao momento não foi considerado como um procedimento a ser realizado para a quantificação de alteração e de fraturação de um agregado, deveria ser considerado como um método complementar à microscopia ótica, permitindo a quantificação de algumas características texturais importantes. Como já foi referido, é um método rápido e expedito, que requer apenas o registo fotográfico de aspetos específicos das amostras aquando da petrografia e o seu processamento através de *software*. Não dispensa, no entanto, uma análise petrográfica cuidada inicial, uma vez que existem minerais diferentes que apresentam características óticas idênticas, em especial quando observados em luz natural (N//).

No ensaio Gel Pat Test, os resultados inicialmente expectáveis não se confirmaram. Verificou-se que os agregados graníticos, classificados como sendo de reação lenta, não conduziram à formação de gel que se observa noutros tipos de rochas, embora apresentem indícios de reação com a pasta de cimento. Os agregados terão libertado álcalis, sílica e alumínio para a pasta de cimento que, com o avanço das RAS, exibiu carbonatação nas zonas junto à interface com os feldspatos. Propõe-se assim, a realização de análises químicas adicionais, em outros prismas de betão, de forma a comprovar os resultados aqui obtidos, bem como procurar uma justificação para esta carbonatação. Seria interessante realizarem-se também ensaios de porosidade nas distintas pastas de cimento, de forma a comprovar a hipótese de que a carbonatação ocorreu devido ao aumento de vazios na pasta de cimento nessas áreas.

Os resultados obtidos através do ataque químico a cristais de feldspatos indicam que esses cristais em contacto com soluções ricas em sódio e com pH elevado são atacados quimicamente, embora não tenha sido possível determinar modificações químicas relevantes. Tal poderá dever-se ao curto período de tempo em que o ensaio foi realizado e à temperatura estabelecida, uma vez que os feldspatos apenas estiveram imersos 18 dias a 38 °C.

Outras alternativas, para a obtenção de resultados com este ensaio, seriam o aumento da duração do ensaio, da concentração da solução de hidróxido de sódio ou da temperatura. No entanto, considera-se mais aconselhável a primeira opção, ou seja, o da duração do ensaio, já que esta é a que mais se assemelha às condições reais do betão. Também seria interessante repetir o ensaio não impregnando completamente a amostra em resina, permitindo assim, uma melhor circulação da solução de hidróxido de sódio pelas fraturas naturais da rocha, de forma a melhor se definir a importância desta fraturação no ataque químico.

As conclusões obtidas a partir dos diferentes ensaios efetuados neste trabalho demonstram que os agregados quando expostos a soluções de elevado pH contribuem com álcalis em teores não desprezáveis, tal como acontece na solução intersticial do betão. A taxa de libertação de álcalis pelos agregados foi condicionada por um conjunto de fatores, como o teor total em álcalis da rocha, os processos de deformação e de alteração a que a rocha foi sujeita, entre outros, sendo necessário ter em atenção as diversas características petrográficas e químicas que a rocha apresenta de modo a realizar uma boa caracterização da mesma.

As conclusões obtidas colocam também em causa alguns aspetos comumente aceites/adotados na literatura e, em geral, pela comunidade científica, relacionados com os requisitos associados à definição de reatividade de um agregado por observação ao microscópio ótico. Seria assim desejável que os resultados aqui obtidos possam vir a servir de recomendação para uma revisão dos conceitos vigentes. A integração de novos métodos em normas, ou o melhoramento dos pré-existentes, é crucial para uma classificação

adequada da libertação de álcalis pelas partículas de um agregado granítico e da sua reatividade. Assim, será importante, em trabalhos futuros, a continuação da comparação de diversos métodos de ensaio de forma a que se consiga melhorar a incerteza vigente na avaliação da reatividade aos álcalis de agregados graníticos para betão.

7. Referências bibliográficas

- ACI Committee 221 (1998): State-of-the-art report on alkali aggregate reactivity, *American Concrete Institute*, Michigan, USA, p. 31, ACI 221.1R-98.
- Ben Haha, M. (2006): Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by sem-image analysis, (Tese de doutoramento em Ciências), Faculté Sciences et Techniques de L'Ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, p.46-49.
- Bérubé, M.; Fournier, B. (1993): Canadian Experience with Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete. *Cement & Concrete Composites*, v.15, p. 27-47.
- Bérubé, M.; Fournier, B. (2000): Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.27, p. 167-191.
- Brown, LS (1955): Some observations on the mechanism of alkali-aggregate reactions. *ASTM Bulletin*, v.205, p.40.
- Cândido de Medeiros, A. (1964): Nota explicativa da Folha nº 13-B, Castelo de Paiva, da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa
- Carman, P. C. (1940): Constitution of colloidal silica. Transactions, *Faraday Society*, v. 36, p 964-973.
- CEB (1992): Durable concrete structures - Design guide, Comité Euro-International du Béton, Task Group 20 Durability and Service Life of Concrete Structures, Thomas Telford Services, Ltd, Lausanne, p. 112.
- Constantiner, D.; Diamond, S. (2003): Alkali release from feldspars into pore solutions. *Cement and Concrete Research*, v.33, p. 549-554.
- Coutinho, J. (1999): Agregados para argamassas e betões, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto (FEUP).
- Coutinho, A.S. (1988): Fabrico e propriedades do betão, v.3. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. (2010): Minerais Constituintes das Rochas – Uma Introdução (4ª Edição). Tradução do original inglês intitulado “An Introduction to the Rock Forming Minerals”, 2ª edição, de 1992. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, p. 543.
- DeHills, SM, Corvalán, J (1964): Undulatory extinction in quartz grains of some Chilean granitic rocks of different ages. *Geological Society of America Bulletin*, v.75.
- Dias, G.; Leterrier, J.; Mendes, A.; Simões, P.P.; Bertrand, J.M. (1998): U-Pb zircon and monazite geochronology of postcollisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (northern Portugal), *Lithos*, v.45, p.349-369.
- Dias, G. (2001): Fontes de granitóides Hercínicos da Zona Centro-Ibérica (norte de Portugal): evidências isotópicas (Sr, Nd), Memórias da Academia de Ciências Lisboa, Portugal, v. 34, p. 121-143.
- Dias, G.; Noronha, F.; Almeida, A.; Simões, P. P.; Martins, H. C. B.; Ferreira, N. (2010): Geochronology and petrogenesis of late-Variscan plutonism (NW Portugal): synthesis and inferences on crustal recycling and growth in the Central Iberian Zone, Ciências Geológicas, Ensino e Investigação e sua História, Geologia Clássica, Publicação Comemorativa do Ano Internacional do Planeta Terra, Associação Portuguesa de Geólogos, Sociedade Geológica de Portugal 1 Cap. II, *Petrologia e Geoquímica*, p.143-160.

- Fernandes, I. (2005): Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betão. Estudo de casos de obra (Tese de Doutoramento em Geologia), Faculdade de Ciências da Universidade do Porto - FCUP, Porto.
- Ferreira, N.; Iglesias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A.; Ribeiro, M. L. (1987): Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico, *Geologia de los Granitóides y Rocas Asociadas dei Macizo Hespérico*. Ed. *Rueda*, Madrid, p. 37-51.
- Ferreira Da Silva, A.; Almeida Rebelo, J.; Ribeiro, M. L. (1989): Nota explicativa da Folha nº 11-C (Torre de Moncorvo) da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa
- French, W. J. (1991): Concrete petrography: a review, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 24, p. 17-48.
- Garcia-Diaz, E.; Riche, J.; Bulteel, D.; Vernet, C. (2006): Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, v.36, p.395-400.
- Godinho, M. M.; Neves, L.; Pereira, A.; Sequeira, A.; Castro, P.; Santos, T. B. (2010): Notícia explicativa da Folha nº 17-A, Viseu, da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa.
- Gogte, B.S. (1973): Na evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkaliaggregate reactions. *Engineering Geology*, v. 7, p. 135-153.
- Gonçalves, L.S.M.; Pinto, A.F.; Araújo, J.R.F.; Fonseca, E.C.; Pinto, M.C.S. (1990): Folha nº 17-B, Fornos de Algodres, da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa.
- Goodge, J. (2016): Electron probe micro-analyzer (EPMA), *Geochemical Instrumentation and Analysis*.
- Grattan-Bellew, P.E. (1994): Alkali contribution from limestone aggregate to pore solution of old concrete, *ACI Materials Journal*, *American Concrete Institute*, v. 91 (2), p. 173-177.
- Gregerová, M.; Pospíšil, P. (2003): Thaumasite and ettringite formation affected by aggregate and cement composition in concrete, *Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials (EMAB)*, 9ª edição, CD-ROM.
- Grover, C. Moreland (1968): Preparation of polished thin sections, *The American Mineralogist*, v.53, p.2070-2074.
- Hobbs, D. W. (1988): Alkali-silica reaction in concrete, *Thomas Telford Ltd.*, London, p. 183.
- Kerr, P. F. (1959): Optical Mineralogy, *Mcgraw-Hill Book Co.*, New York. 3ª edição, p.442-1959.
- Le Roux, A. (1991): Méthodes pétrographiques d'étude de l'alcali-réaction, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, nº 44, p. 47-54.
- LNEC E 461 (2007): Betão. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. Especificação LNEC, Lisboa.
- Lindgård, J.; Nixon, P. J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B. J.; Haugen, M.; Åkesson, U. (2010): The EU "PARTNER" Project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations. *Cement and Concrete Research*, v.40.
- Locati, F.; Marfil, S.; Baldo, E.; Maiza, P. (2010): Na₂O, K₂O, SiO₂ and Al₂O₃ release from potassic and calcic-sodic feldspars into alkaline solutions, *Cement and Concrete Research*, v.40, p.1189–1196.

- Menéndez, E.; Préndez, N.; Márquez, C.; Aldea, B. (2012): Evaluation of granitic aggregates behavior in relation with the alkaline extraction and compositional change in their phases, *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, Austin, USA, p.10.
- Neiva, J. M. C. (1958): Barragem do Alto Rabadão. Reconhecimento Geológico, Hidroeletric do Cávado, p.31.
- Neiva, J. M. C.; Neiva, A. M. R.; Godinho, M. M. (1965): Meteorização do granito em clima temperado quente – Alteração do granito de pisões (Montalegre), *Memória e Notícia nº 60*, Publicações do Museu do laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra e Centro de Estudos Geológicos, p. 33-53.
- Neville, A. M. (2003): *Properties of concrete*, Pearson Education Limited, *Essex*, p.844.
- Nixon, P. J.; Hawthorn, F.; Sims, I. (2004). Developing an international specification to combat AAR proposals of RILEM TC 191-ARP, Tang, M and Deng, M (eds), *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Beijing, China, p. 8-16.
- Nixon P. J.; Sims I. (2016): AAR-0 - Outline Guide to the Use of RILEM Methods in the Assessment of the Alkali-Reactivity Potential of Aggregates. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, p. 5-34, ISBN: 978-94-017-7251-8. e-ISBN: 978-94-017-7252-5.
- Nixon P. J.; Sims I. (2016): AAR-3 - Detection of Potential Alkali-Reactivity – 38 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, p. 79-97, ISBN: 978-94-017-7251-8. e-ISBN: 978-94-017-7252-5.
- Noronha, F.; Ribeiro, M. L. (1983): Carta geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha 6-A, Montalegre, *Serviços geológicos de Portugal*.
- NP EN 12620 (2004): Agregados para betão, *Norma Portuguesa da Qualidade*, p.56.
- NP EN 197-1 (2001): Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes., *Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade*, p.35.
- NP EN 206-1 (2007): Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, *Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade*, p.38.
- Pereira, E.; Ribeiro, A.; Silva, N. (1999): Folha nº 7-D, Macedo de Cavaleiros, da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa.
- Pereira, E.; Farinha, J. B.; Vieira da Silva, A. M.; Ferreira, O. V. (2006): Notícia explicativa da folha 13-D: Oliveira de Azeméis. *Inst. Geol. e Mineiro*, Lisboa.
- Prince, W.; Castanier, G.; Giafferi, J. L. (2001): Similarity between alkali-aggregate reaction and the natural alteration of rocks, *Cement and Concrete research*, v.31, p.271 – 276.
- Prince, W.; Perami, R. (1993): Mise em evidence du role essentiel des ions OH dans les reactions alcali-silice, *Cement and Concrete Research*, v. 23 (5), p. 1121-1129.
- Poole, A. B. (1992): Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete, In: Swamy, R.N. (Editor), *The alkali-silica reaction in concrete*, *Blackie and Son Ltd.*, London, p. 1-29.

- Potts, P. J.; Bowles, J. F.; Reed, S. J.; Cave, R. (1995): Microprobe Techniques in the Earth Sciences, *The Mineralogical Society Series*, SBN: 978-0-412-55100-0 (Impress) 978-1-4615-2053-5 (Online), v.6, p. 42-50.
- Ramos, V. (2013): Characterization of the potential reactivity to alkalis of Portuguese aggregates for concrete (Tese de Doutoramento em Geociências). Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento de Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- Ramos, V.; Fernandes, I.; Santos Silva, A.; Soares, D.; Fournier, B.; Leal, S.; Noronha, F. (2016): Assessment of the potential reactivity of granitic rocks — Petrography and expansion tests. *Cement and Concrete Research*.
- Reed, S. J. B. (1996): Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. Cambridge University Press, Cambridge, p. 206.
- Rendell, F.; Jauberthie, R.; Grantham, M. (2002): Deteriorated concrete. Inspection and physicochemical analysis, *Thomas Telford*, London, p. 194.
- Santos Silva, A. (2005): Degradação do betão por reacções álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção (Tese de Doutoramento em Engenharia Civil), LNEC/Universidade do Minho, Guimarães, p.339.
- Sims, I., Brown, B. (1998): Concrete aggregates, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Arnold. London, 4^o edição, p. 903-1011.
- Soares, D. (2014): Estudo e caracterização de agregados para betão. Avaliação da sua contribuição para o aumento da alcalinidade e no desenvolvimento da reação álcalis-sílica no betão (Tese de Mestrado em Análises Químicas Ambientais), Escola de Ciências e Tecnologia (ECT), Universidade de Évora, Évora.
- Stanton, T. E. (1940): Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proc. American Society of Civil Engineers*, v.66, p. 1781-1811.
- Stievenard-Gireaud, D. (1987): Etude de la réaction alcalis-silice dans des bétons, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, *Rapport de recherche LPC*, n^o 144, Paris, p. 104.
- St John, D. A.; Poole, A. B.; Sims, I. (1998) Concrete petrography - A handbook of investigative techniques, *Arnold*, U.K, p.474.
- Lanza, V.; Alaejos, P. (2012): Optimized Gel Pat Test for Detection of Alkali-Reactive Aggregates; *ACI Materials Journal*, p.109-M38.
- Robie, R. A.; Hemingway, B. S.; Fischer (1978). Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (105 Pascals) and at higher pressures and higher temperatures. *United States Geological Survey Bulletin*, p.1452-1456.
- Villeneuve, V. (2011): Détermination de L'Endommagement du Béton par Méthode Pétrographique Quantitative (Tese de Mestrado). Département de Géologie et Génie Géologique de la Faculté de Sciences et Génie de la Université Laval, Quebec, Canadá.
- West, G. (1991): A note on undulatory extinction of quartz in granite, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 24, p.159-165.
- West, G. (1994): Undulatory extinction of quartz in some British granites in relation to age and potential reactivity, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 27, Part 1, p. 69-74.

Zollinger, D. G.; Mukhopadhyay, A. K.; Ghanem, H.; Shon, C-S.; Gress, D.; Hooton, D. (2009): Mitigation of ASR in concrete pavement – combined materials testing., *Innovative Pavement Research Foundation*, p.117, Report IPRF-01-G-002-03-2.

Anexo 1

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A1 - Condições analíticas utilizadas na análise dos Feldspatos em EPMA

Elemento	Risca Analítica	Cristais Analisadores e Detetor	Padrões
Ca	Ka	PETJ	Diópsido
Na	Ka	TAP	Tugtupite
Sr	La	PETJ	Celestite
Si	Ka	PETH	Sanidina
Ba	La	PETJ	Benitoite
Mg	Ka	TAP	Olivina
Ti	Ka	PETJ	Rutilo
K	Ka	PETH	Sanidina
Mn	Ka	PETJ	Bustamite
Al	Ka	TAP	Piropo
Fe	Ka	LIFH	Almandina

Anexo 2

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A2 - Condições analíticas utilizadas na análise da pasta de cimento em EPMA

Elemento	Risca Analítica	Cristais Analisadores e Detetor	Padrões
Ca	Ka	PETJ	Diópsido
F	Ka	TAP	Fluorite
Si	Ka	PETJ	Olivina
Rb	La	PETH	Clorite
Ti	Ka	PETJ	Rutile
Na	Ka	TAP	Jadeíte
Cl	Ka	PETJ	Tugtupite
K	Ka	PETH	Sanidina
Cr	Ka	PETJ	Óxido de Crómio
Mg	Ka	TAP	Clorite
Cs	La	PETJ	Polucite
Ba	La	LIFH	Barite
Mn	Ka	PETJ	Bustamite
Al	Ka	TAP	Almandina
Ni	Ka	LIF	Silício de níquel
Fe	Ka	LIFH	Caersutite

Anexo 3

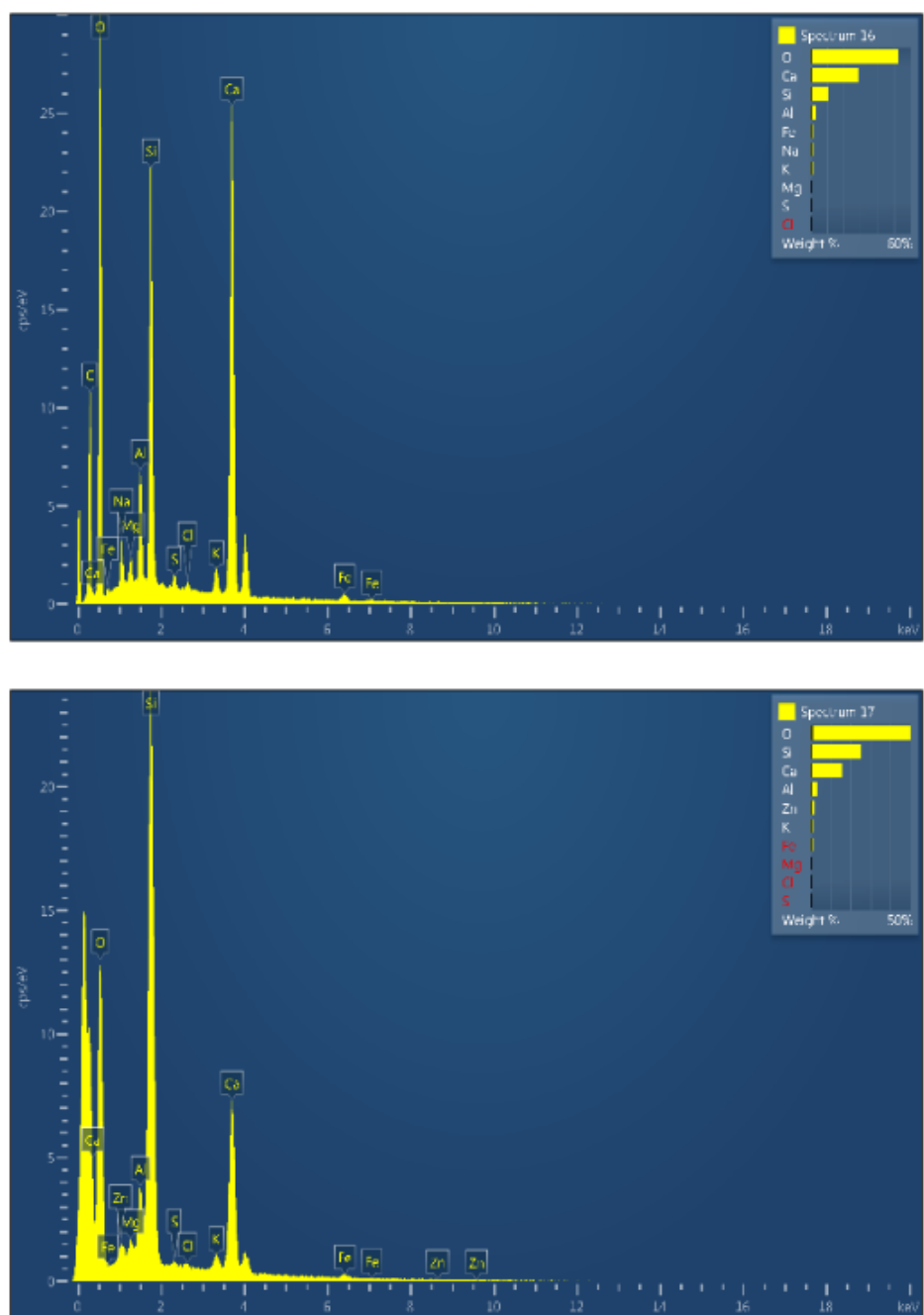


Figura A3 – Espectros EDS da pasta de cimento de coloração clara (PC; espectro superior) e da pasta de cimento de coloração escura (PE; espectro inferior).

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A4.1 - Análises químicas de feldspatos em EPMA do ensaio Gel Pat Test (em %)

Amostra	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT
Referência	GPT_b10	GPT_b10	GPT_b10	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4
Análise	1	2	3	1	2	3	4	5	6
SiO₂	64,435	64,462	65,671	67,782	68,486	68,020	68,440	68,321	69,230
Na₂O	0,601	0,490	0,241	10,339	10,894	11,083	11,091	11,075	11,104
BaO	0,026	0,129	0,150	0,000	0,000	0,019	0,014	0,052	0,019
K₂O	17,025	16,483	16,650	0,092	0,094	0,091	0,085	0,075	0,115
CaO	0,064	0,048	0,025	0,781	0,710	0,679	0,532	0,499	0,197
MgO	0,019	0,019	0,003	0,025	0,004	0,000	0,003	0,004	0,000
TiO₂	0,000	0,034	0,000	0,000	0,019	0,000	0,012	0,017	0,000
SrO	0,133	0,000	0,085	0,000	0,000	0,165	0,059	0,044	0,000
Al₂O₃	17,895	17,846	17,824	19,285	19,169	19,000	19,157	19,189	18,953
MnO	0,016	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,036	0,000	0,000
FeO(t)	0,000	0,024	0,027	0,034	0,017	0,013	0,016	0,025	0,007
Total	100,21	99,54	100,68	98,34	99,41	99,07	99,45	99,30	99,63

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela 4.2 – Química mineral dos feldspatos perto dos limites de agregados analisados em EPMA na lâmina de betão submetido ao ensaio Gel Pat Test.

Amostra	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT
Referência	GPT_b10	GPT_b10	GPT_b10	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4	GPT_b4
Análise	1	2	3	1	2	3	4	5	6
Número de catiões calculados com base em 32 Oxigénios									
Si⁴⁺	11,98	12,02	12,09	12,01	12,02	12,01	12,01	12,03	12,10
Al³⁺	3,92	3,92	3,87	4,03	3,97	3,96	3,99	3,99	3,91
Fe³⁺	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Y-Total	15,91	15,95	15,97	16,04	15,99	15,97	16,00	16,02	16,01
Ti⁴⁺	0,00	0,00	0,00	0,15	0,13	0,13	0,00	0,00	0,04
Ca²⁺	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,14	0,09	0,00
Mg²⁺	0,01	0,01	0,00	3,55	3,71	3,80	0,00	0,01	3,76
Na⁺	0,22	0,18	0,09	0,02	0,02	0,02	3,68	3,66	0,03
K⁺	4,04	3,92	3,91	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00
Ba²⁺	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr²⁺	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Mn²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
X-Total	4,29	4,13	4,02	3,73	3,86	3,97	3,85	3,81	3,83
Or (%)	94,51	95,33	97,71	0,56	0,54	0,52	0,49	0,43	0,67
Ab (%)	5,07	4,31	2,15	95,29	95,97	96,22	96,92	97,12	98,37
Na (%)	0,30	0,23	0,12	3,98	3,46	3,26	2,57	2,42	0,96

Anexo 5

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A5.1 - Análises químicas de feldspatos em EPMA do ensaio Gel Pat Test (em %).

Amostra	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT
Referência	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b2	GPT_b2	GPT_b2
Análise	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
SiO₂	65,624	65,128	63,903	64,300	63,359	64,499	64,235	68,447	67,595	67,695
Na₂O	0,437	0,456	0,449	0,369	0,326	0,436	0,456	10,608	10,726	10,525
BaO	0,138	0,124	0,119	0,143	0,176	0,000	0,074	0,024	0,019	0,035
K₂O	16,369	16,208	16,327	16,307	16,209	16,336	16,357	0,056	0,121	0,099
CaO	0,105	0,063	0,096	0,104	0,182	0,084	0,054	1,064	1,085	1,110
MgO	0,000	0,000	0,001	0,000	0,024	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
TiO₂	0,006	0,000	0,122	0,052	0,000	0,044	0,010	0,000	0,000	0,000
SrO	0,000	0,000	0,109	0,065	0,082	0,157	0,145	0,112	0,047	0,000
Al₂O₃	17,919	18,324	17,852	17,902	17,587	18,040	18,097	19,446	19,337	19,550
MnO	0,007	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,022
FeO(t)	0,045	0,066	0,046	0,000	0,029	0,000	0,016	0,026	0,000	0,066
Total	100,65	100,37	99,06	99,24	97,97	99,61	99,46	99,78	98,93	99,10

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A5.2 - Química mineral dos feldspatos do interior das partículas de agregado longe de fraturas em EPMA na lâmina do betão submetido ao ensaio Gel Pat Test.

Amostra	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT	GPT
Referência	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b11	GPT_b2	GPT_b2	GPT_b2
Análise	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3
Número de catiões calculados com base em 32 Oxigénios										
Si⁴⁺	12,07	12,01	12,00	12,02	12,02	12,01	11,99	11,98	11,95	11,94
Al³⁺	3,88	3,98	3,95	3,95	3,93	3,96	3,98	4,01	4,03	4,06
Fe³⁺	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Y-Total	15,96	16,00	15,98	15,98	15,95	15,98	15,98	16,00	15,98	16,01
Ti⁴⁺	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca²⁺	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,20	0,21	0,21
Mg²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na⁺	0,16	0,16	0,16	0,13	0,12	0,16	0,17	3,60	3,68	3,60
K⁺	3,84	3,81	3,91	3,89	3,92	3,88	3,90	0,01	0,03	0,02
Ba²⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Sr²⁺	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00
Mn²⁺	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X-Total	4,03	4,00	4,12	4,06	4,11	4,07	4,10	3,83	3,92	3,84
Or (%)	95,61	95,60	95,53	96,18	95,99	95,63	95,68	0,33	0,70	0,58
Ab (%)	3,88	4,09	3,99	3,31	2,93	3,88	4,05	94,44	94,04	93,94
An (%)	0,52	0,31	0,47	0,52	0,91	0,41	0,27	5,23	5,26	5,47

Estabilidade química de agregados de natureza granítica incorporados em betões de cimento Portland

Tabela A6 - Análises químicas pontuais de PC e PE em EPMA após o ensaio Gel Pat Test (em %).

Pasta de cimento	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PE	PE	PE	PE
SiO₂	11,734	27,592	9,301	13,696	12,956	12,574	14,319	21,532	21,898	14,588
Na₂O	1,064	2,692	0,816	0,914	1,129	1,062	0,876	1,378	1,322	0,860
MnO	0,000	0,039	0,006	0,000	0,000	0,013	0,000	0,033	0,056	0,004
K₂O	1,585	2,309	0,367	0,233	0,548	0,669	0,390	0,626	0,625	0,400
TiO₂	0,058	0,044	0,064	0,119	0,054	0,111	0,038	0,056	0,044	0,099
MgO	0,139	2,891	0,432	0,453	0,439	0,549	0,231	0,612	0,588	0,541
Cs₂O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe₂O₃	0,360	3,416	0,558	1,903	0,567	2,214	0,740	0,768	0,772	0,507
CaO	36,795	17,586	53,063	29,641	41,690	38,533	46,080	23,943	23,850	39,147
Al₂O₃	6,666	10,935	1,315	1,981	1,975	2,924	1,541	2,636	2,565	1,358
Cl	0,274	0,314	0,057	0,365	0,087	0,205	0,048	0,318	0,333	0,189
BaO	0,007	0,015	0,000	0,000	0,033	0,020	0,022	0,000	0,000	0,010
Cr₂O₃	0,000	0,033	0,000	0,027	0,000	0,000	0,034	0,026	0,041	0,000
F	0,152	0,147	0,054	0,132	0,000	0,000	0,000	0,115	0,311	0,201
P₂O₅	0,108	0,127	0,083	0,018	0,070	0,107	0,058	0,086	0,081	0,078
Rb₂O	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H₂O	41,182	31,994	33,919	50,657	40,470	41,061	35,634	47,992	47,720	42,144
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Na₂O_{eq}	2,107	4,211	1,057	1,067	1,490	1,502	1,133	1,790	1,733	1,123

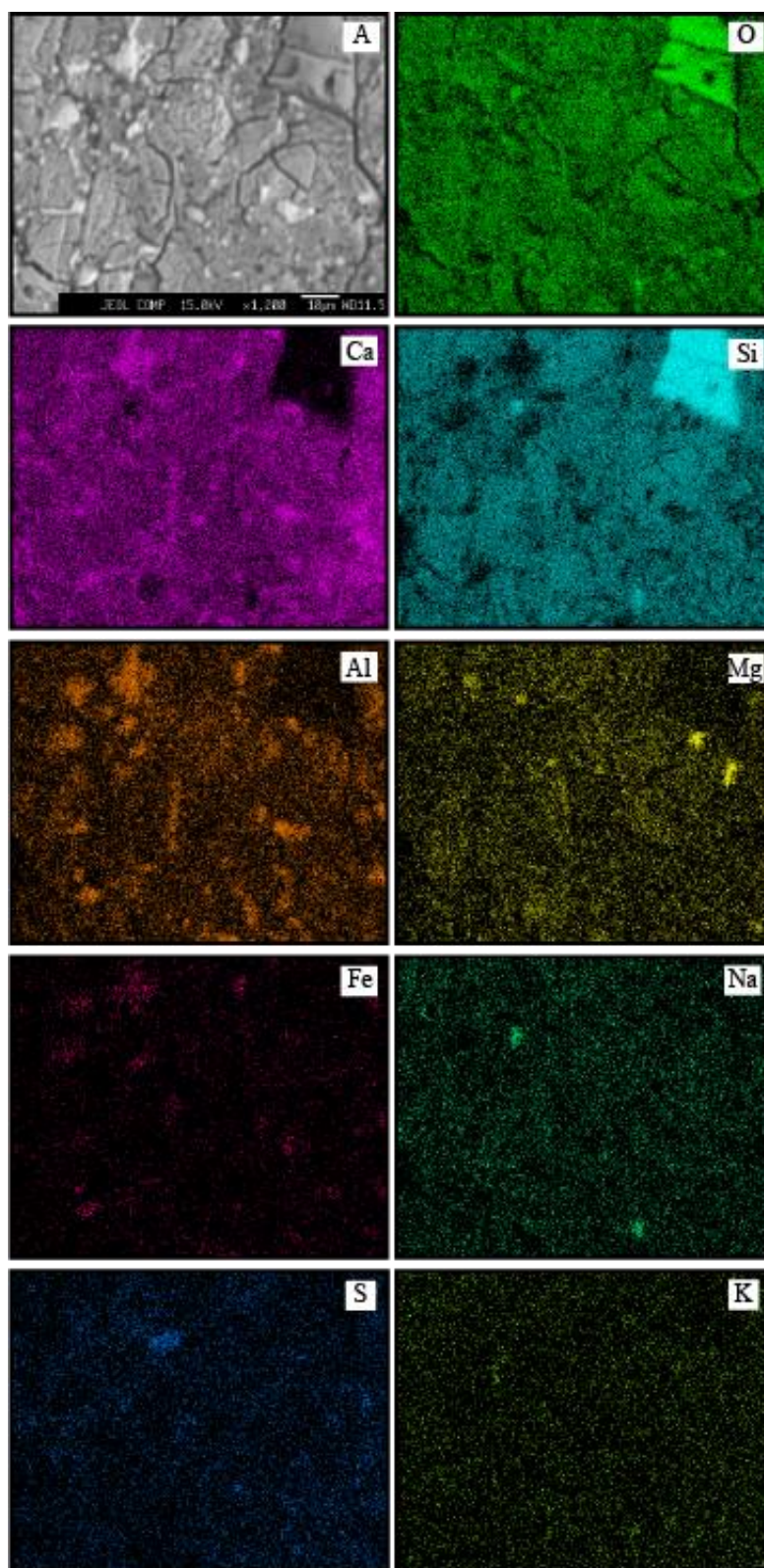


Figura A 7.1 - Mapas de elementos de uma área cuja pasta de cimento é maioritariamente PC e onde se observa uma partícula de agregado de quartzo: A) Foto da área analisada quimicamente; B) Mapas composicionais (elemento respetivo no canto superior direito).

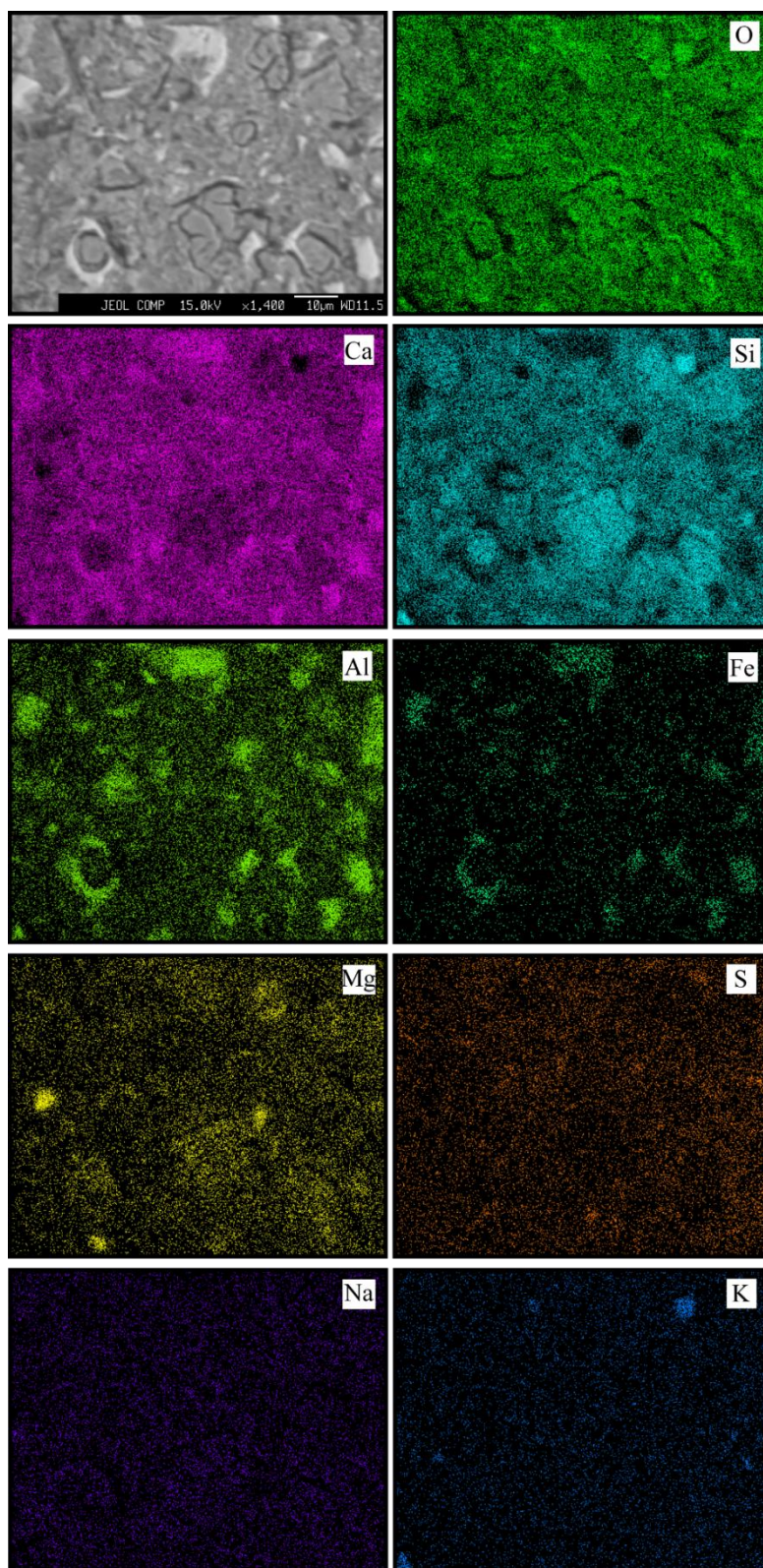


Figura A7.2 - Mapas de elementos de uma área cuja pasta de cimento é maioritariamente PE e onde se observa uma partícula de agregado de quartzo: A) Foto da área analisada quimicamente A); B) Mapas composicionais (elemento respetivo no canto superior).

Anexo 8

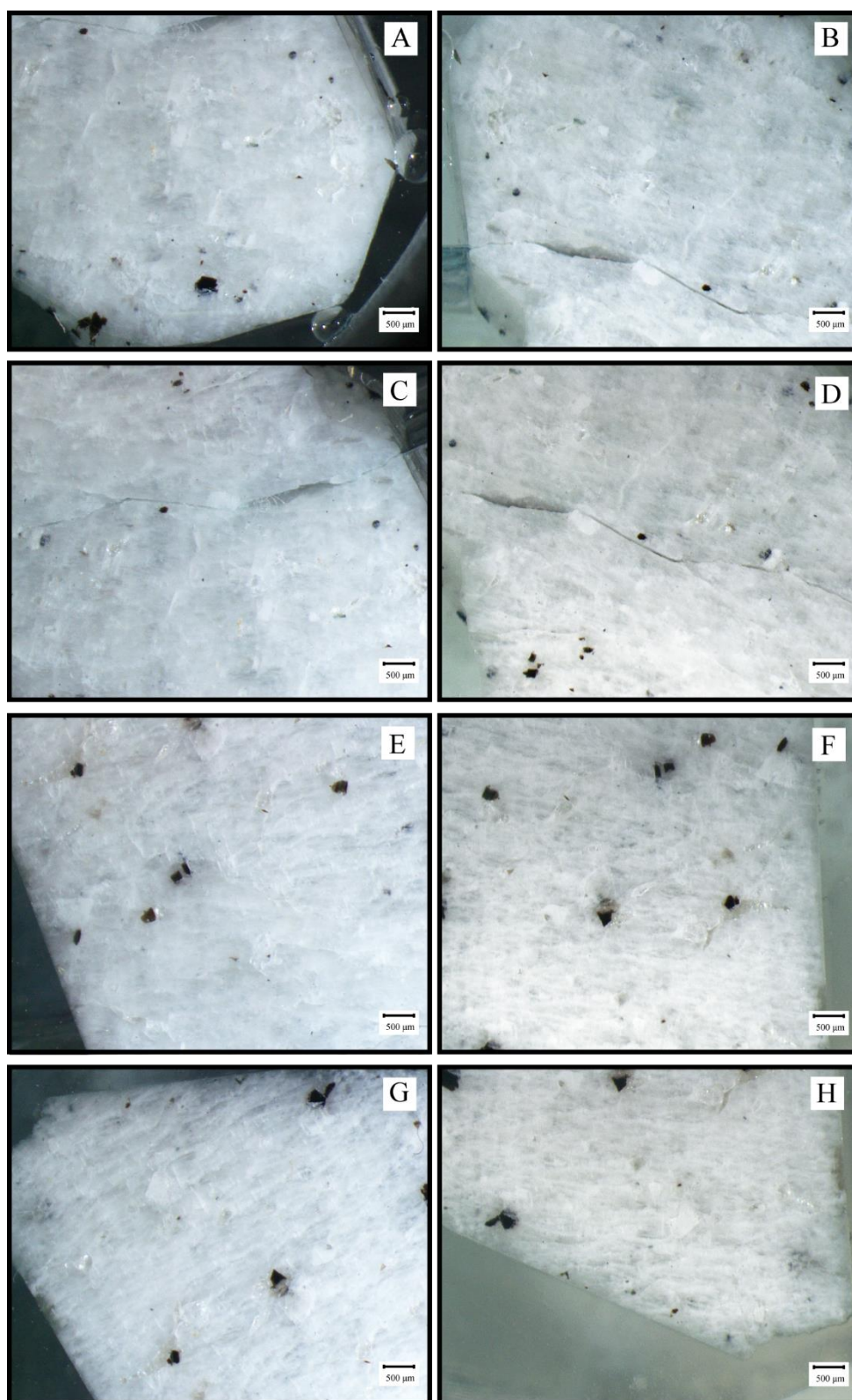


Figura A8.1 - Feldspato retirado da laje de granite são não submetido a ensaio: A, C, E, G; B, D, F, G.

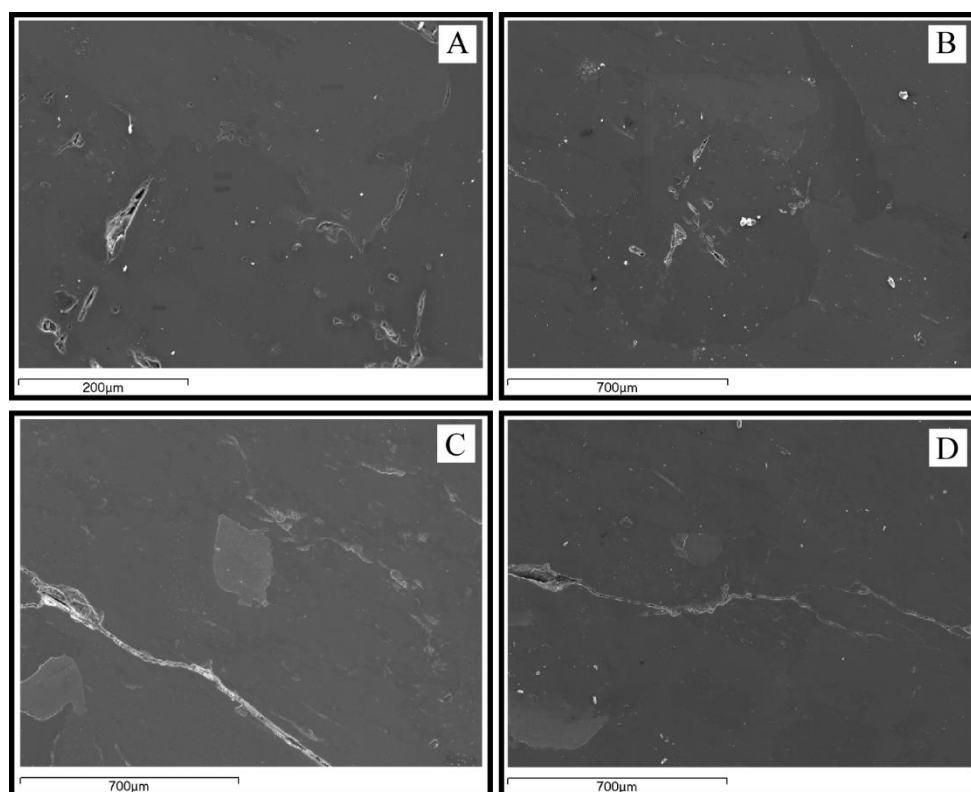


Figura A8.2 - Imagens obtidas ao MEV no modo de elétrons secundários das diferentes áreas analisadas relativas a: A) Figura A8.3; B) Figura A8.4; C) Figura A8.5; F) Figura A8.6.

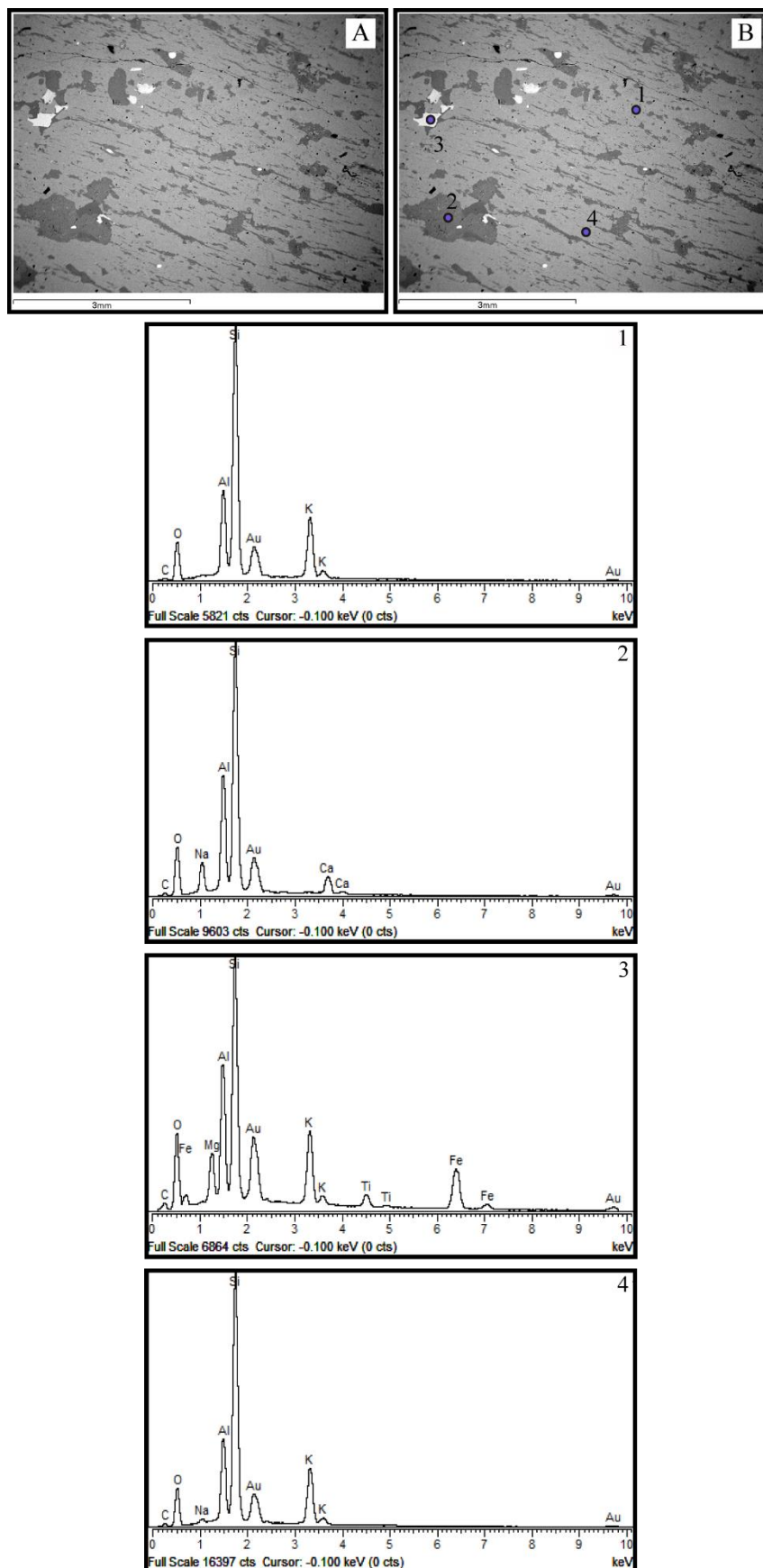


Figura A8.3- Imagens ao MEV no modo de elétrons retrodifundidos (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-plagioclase; 3-biotite, 4-feldspato-K.

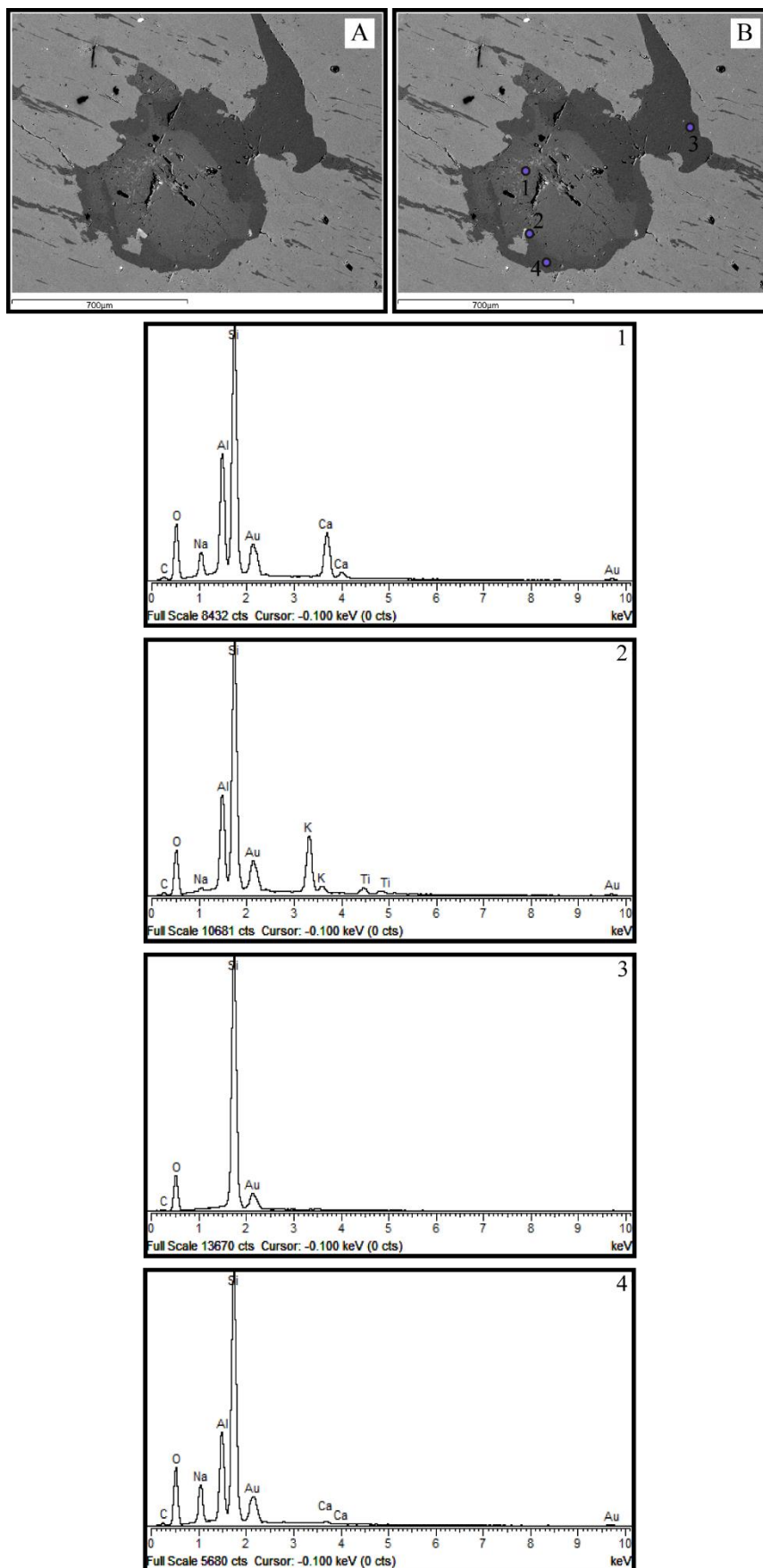


Figura A8.4 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-plagioclase; 2-feldspato-K; 3-quartzo, 4-plagioclase.

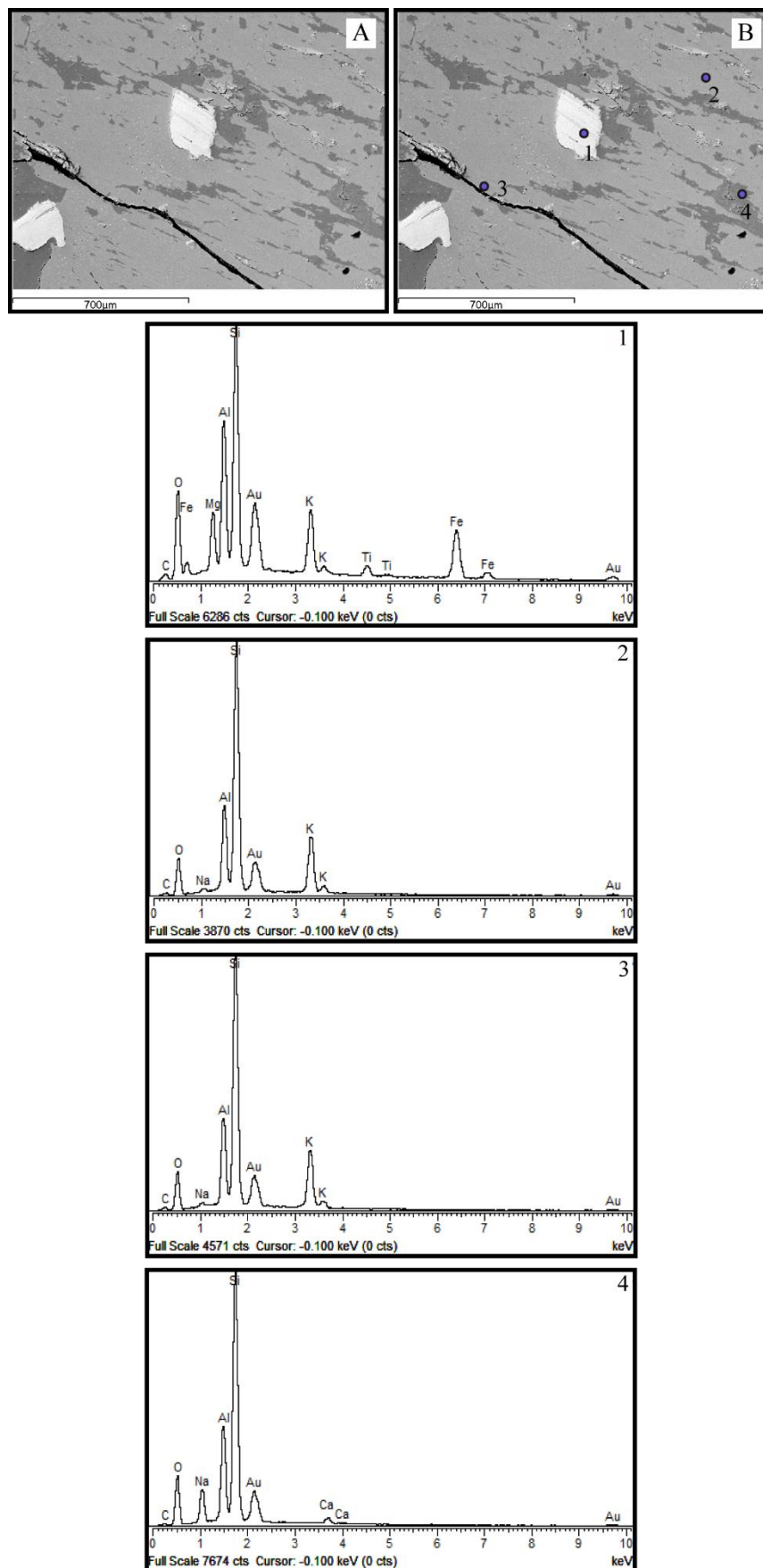


Figura A.5 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-biotite; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-plagioclase.

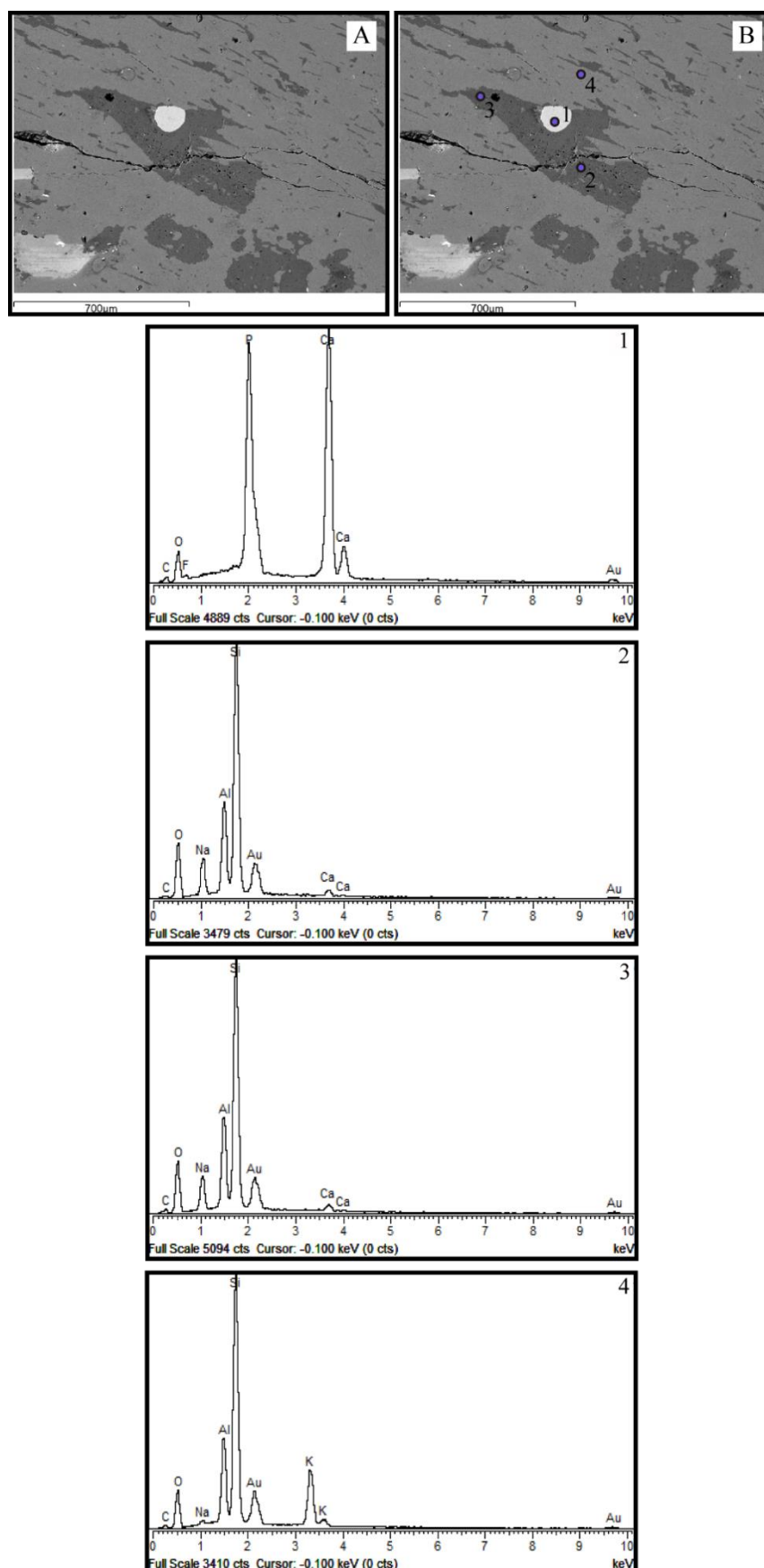


Figura A8.6 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-apatite; 2-plagioclase; 3-plagioclase, 4-feldspato-K.

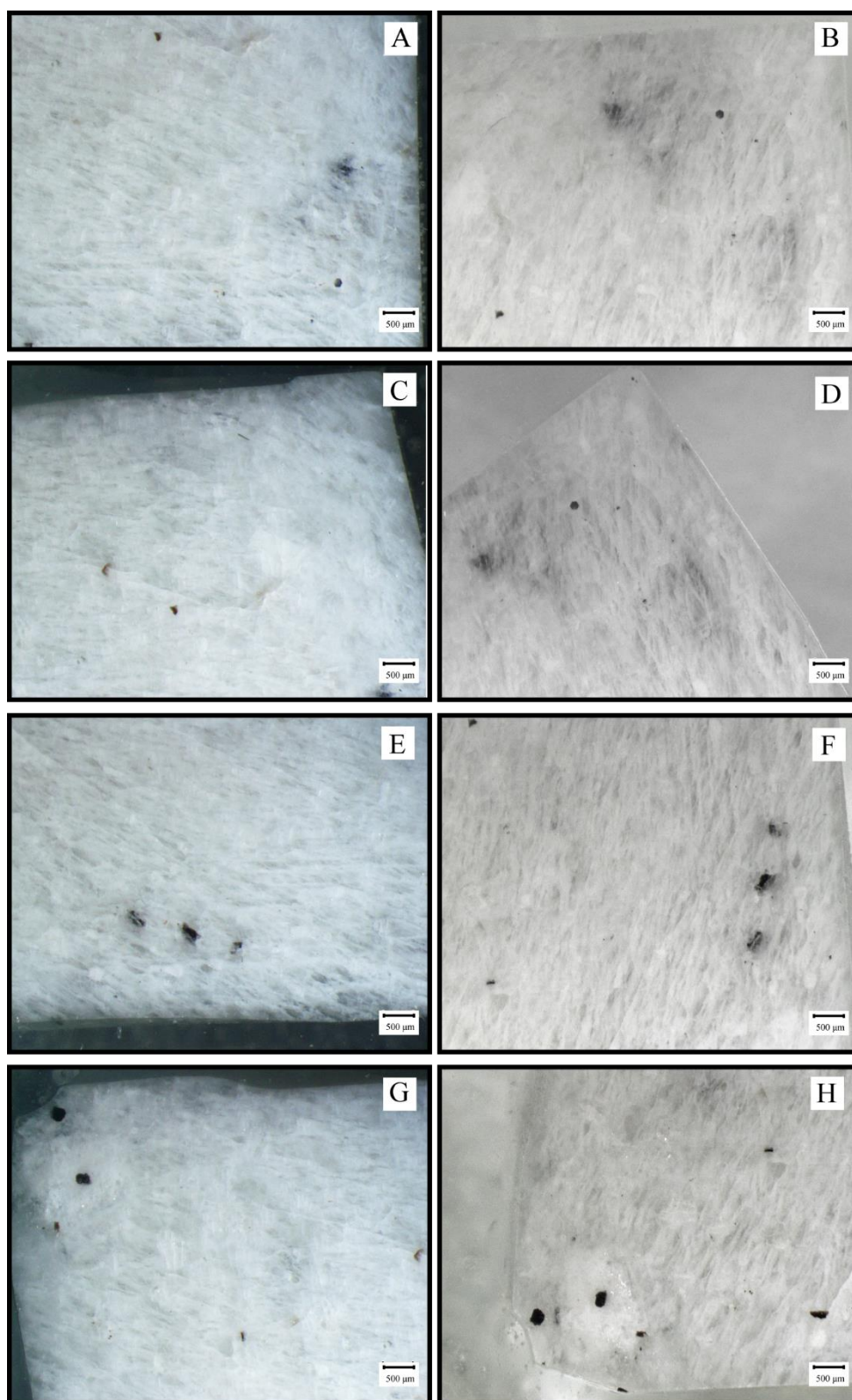


Figura A8.7 - Feldspato retirado da laje de granite são: A, C, E, G (antes da realização do ensaios); B, D, F, G (após o ensaio).

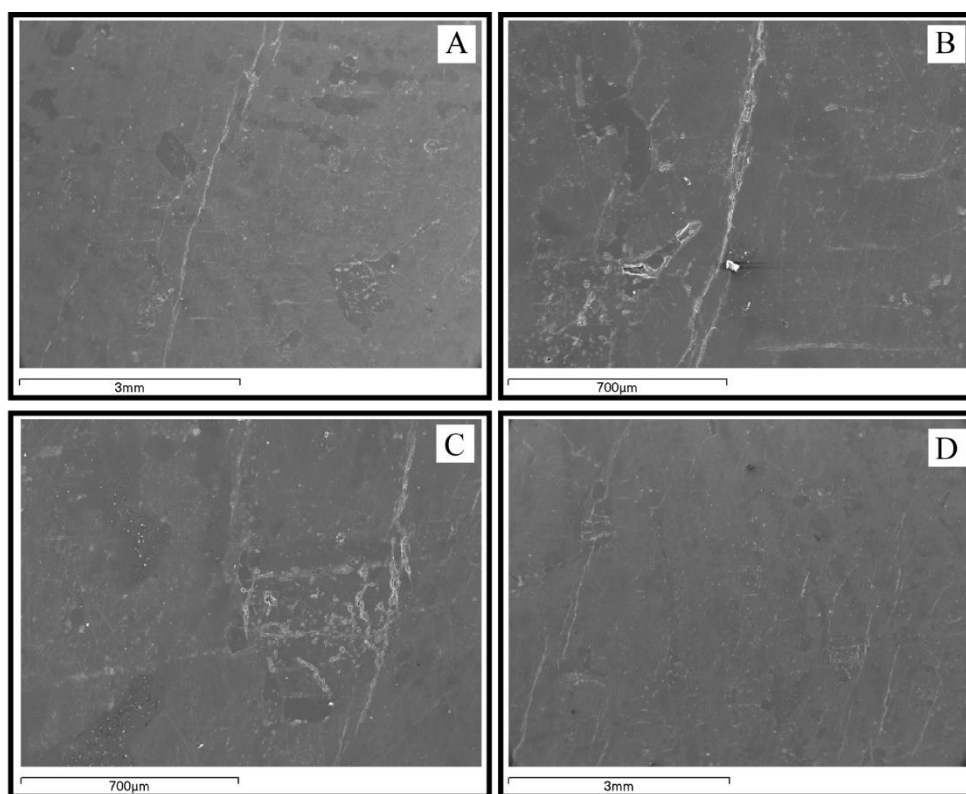


Figura A8.8 – Imagens de contraste topográfico obtidas ao MEV (BSE) em elétrons secundários das diferentes áreas analisadas relativas às: A) Figura A8.9; B) Figura A8.10; C) Figura A8.11; D) Figura A8.12.

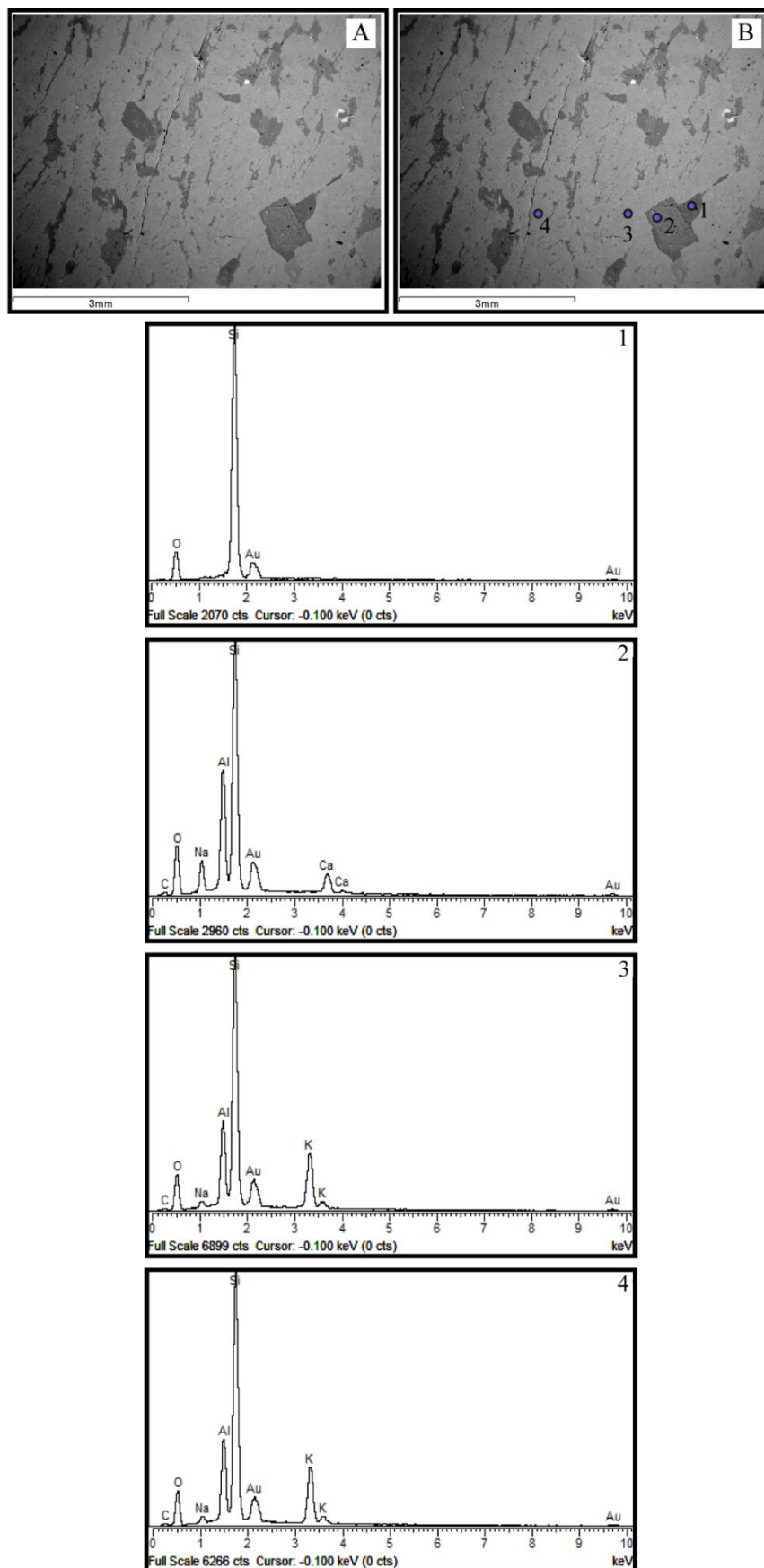


Figura A8.9 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.

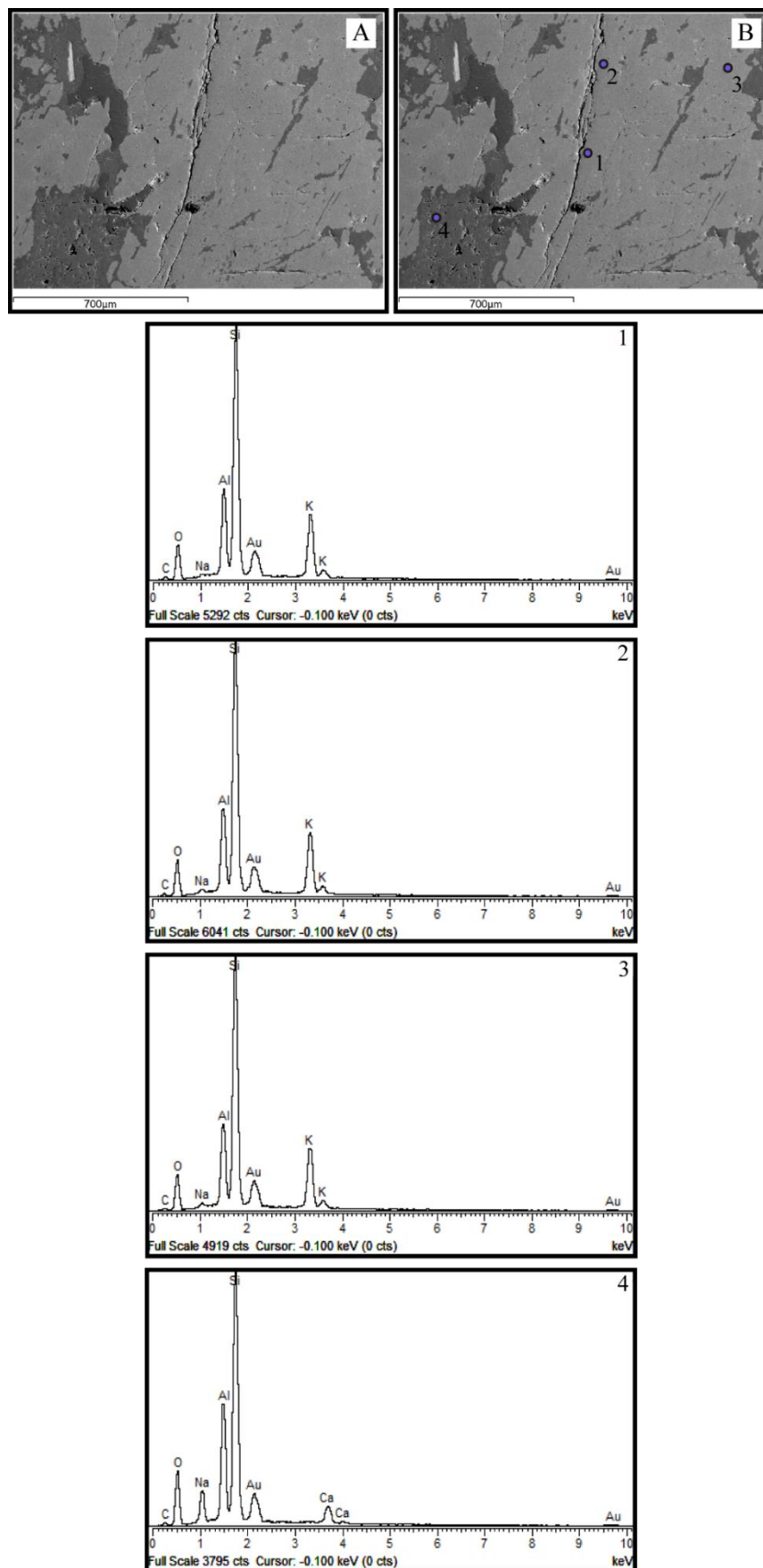


Figura A8.10 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K; 4-plagioclase.

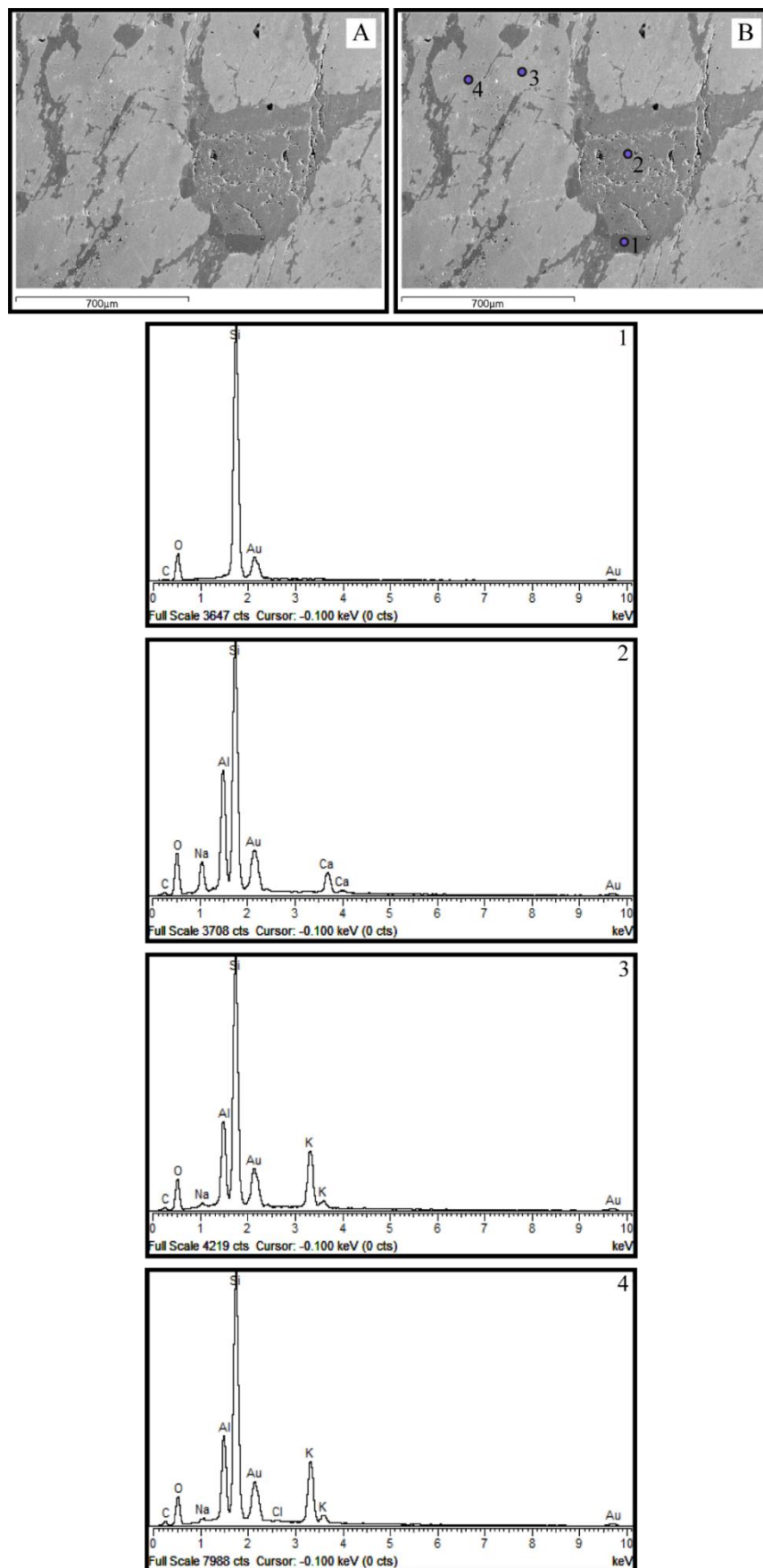


Figura A8.11 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.

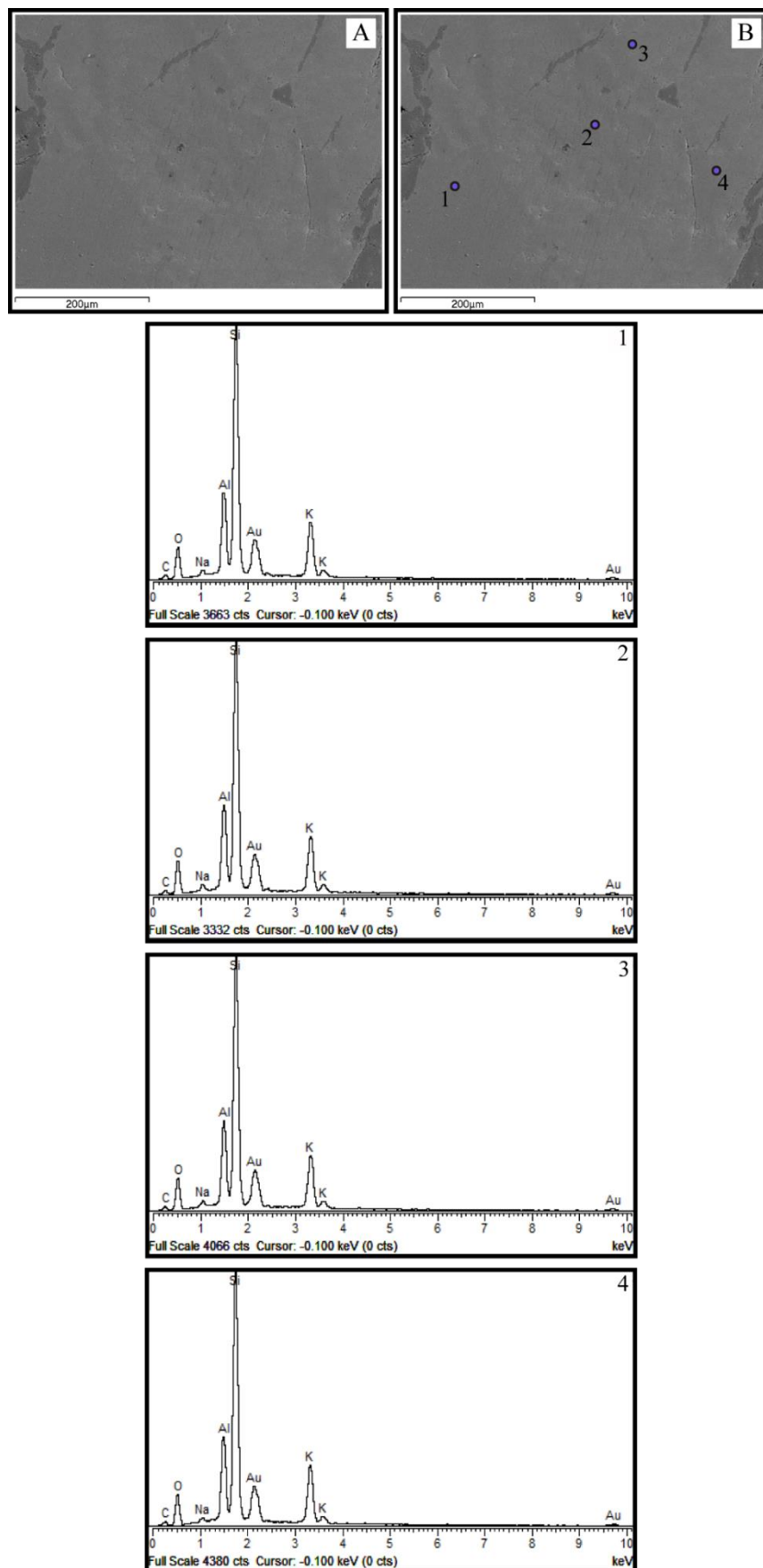


Figura A8.12 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.

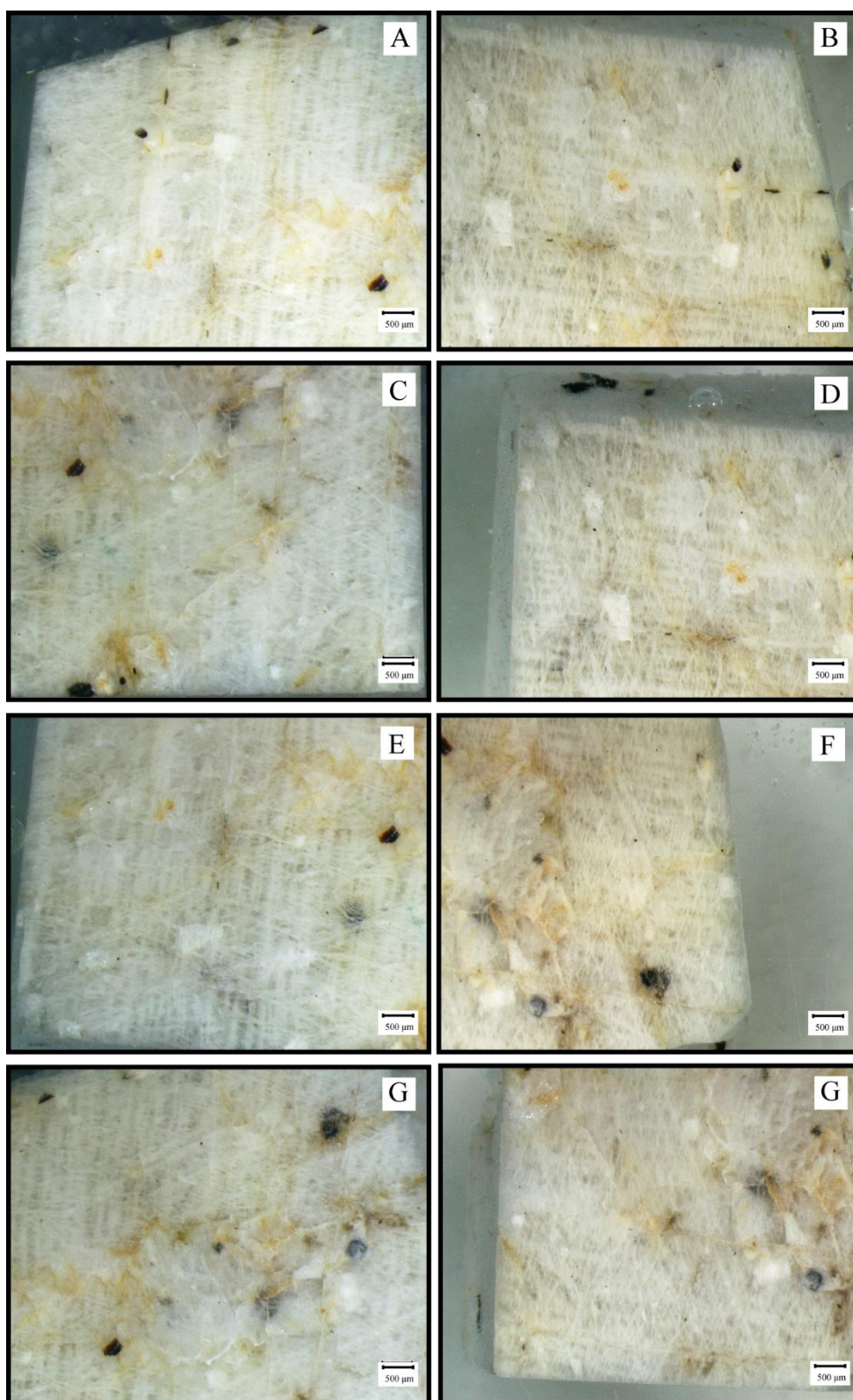


Figura A8.13 - Feldspato retirado da laje de granito alterado não submetido a ensaio: A, C, E, G,; B, D, F, G.

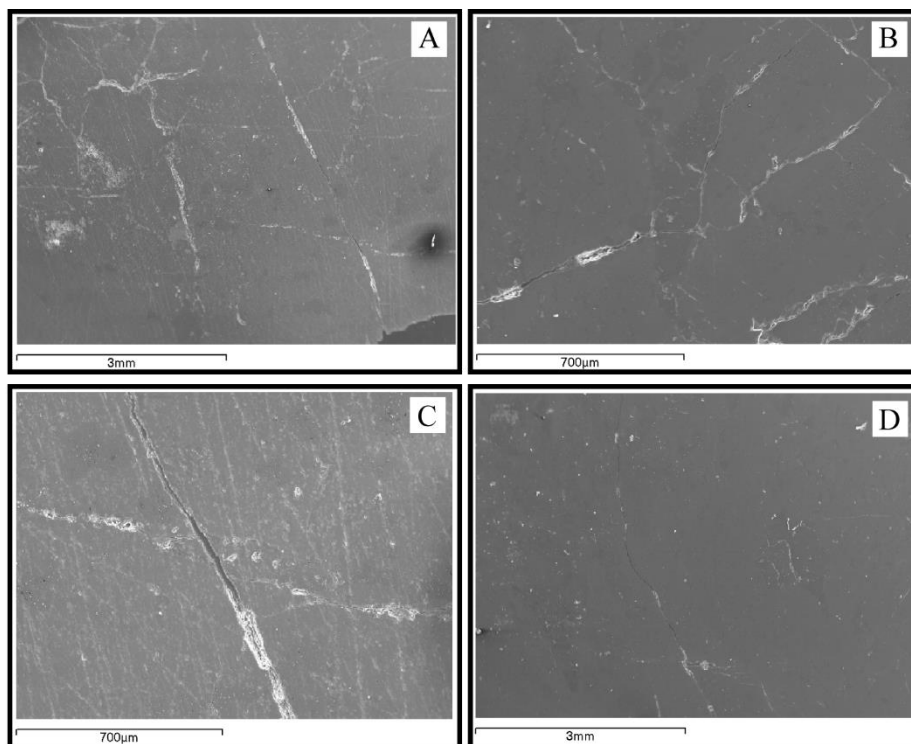


Figura 8.14 – Imagem de contraste topográfico obtidas ao MEV em eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativa a: A) Figura A8.15; B) Figura A8.16; C) Figura A8.17; D) Figura A8.18.

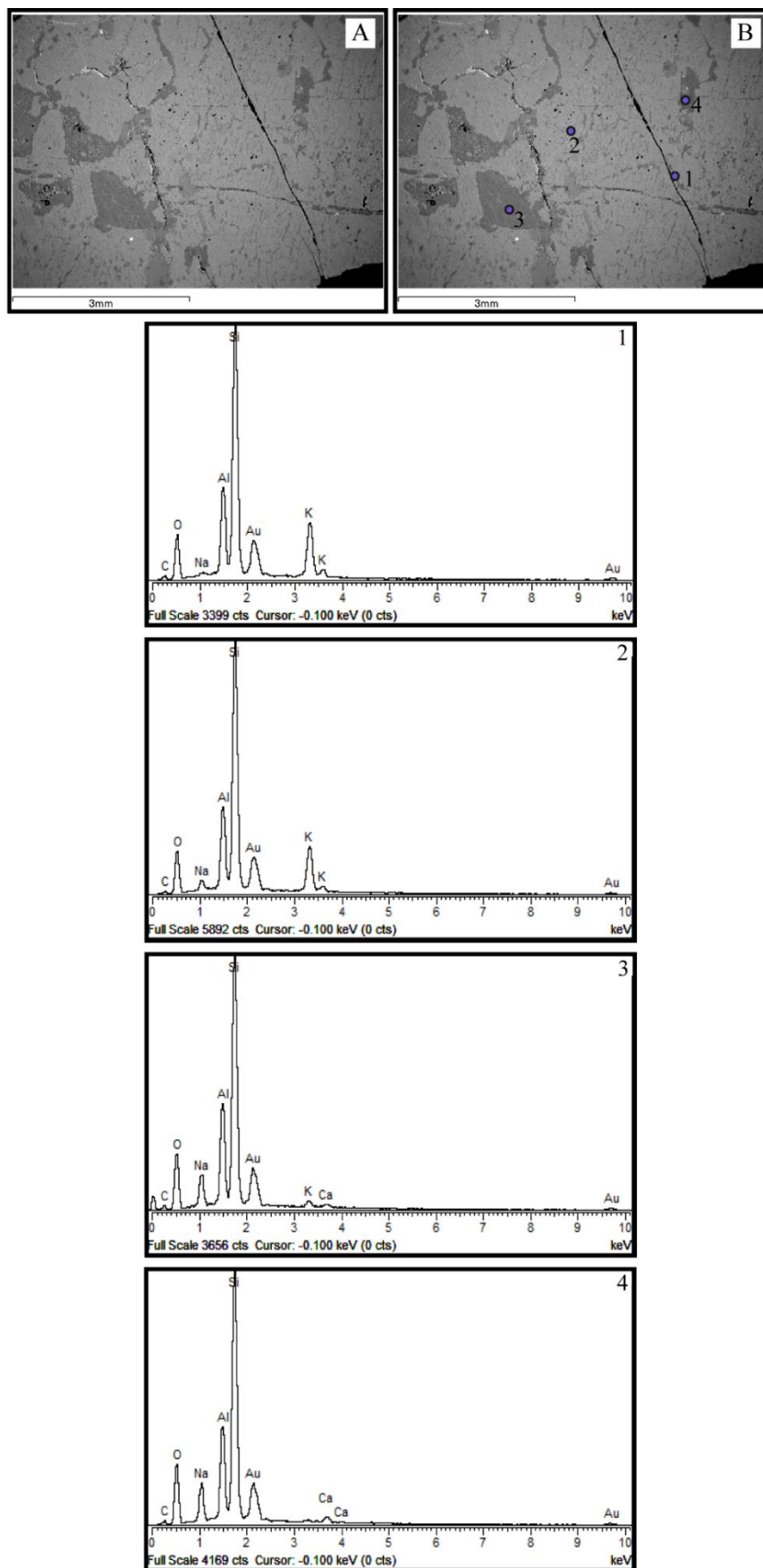


Figura A8.15 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-plagioclase.

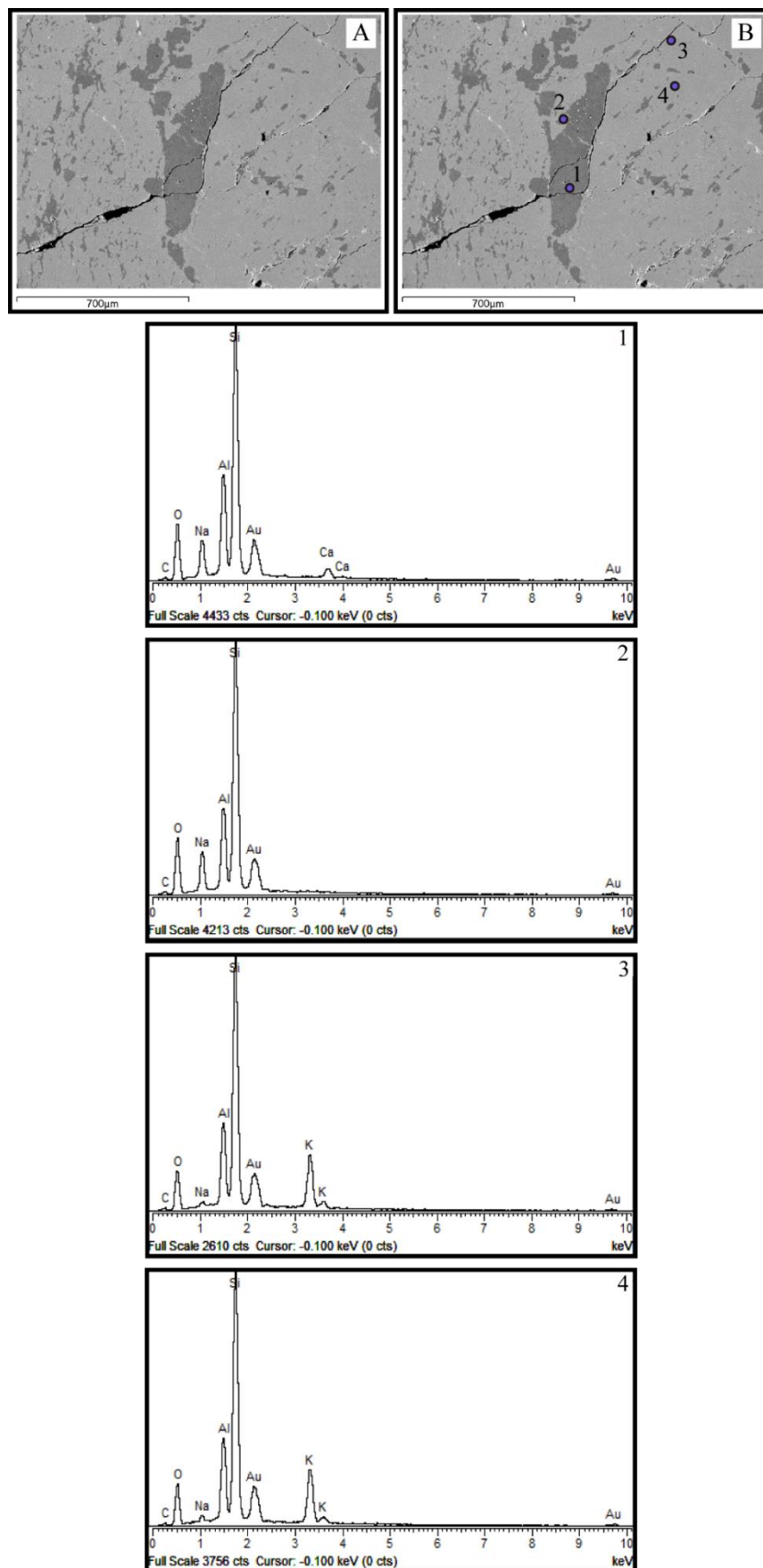


Figura 8.16 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-plagioclase; 2-plagioclase; 3-feldspato-K, 4-feldspato-K.

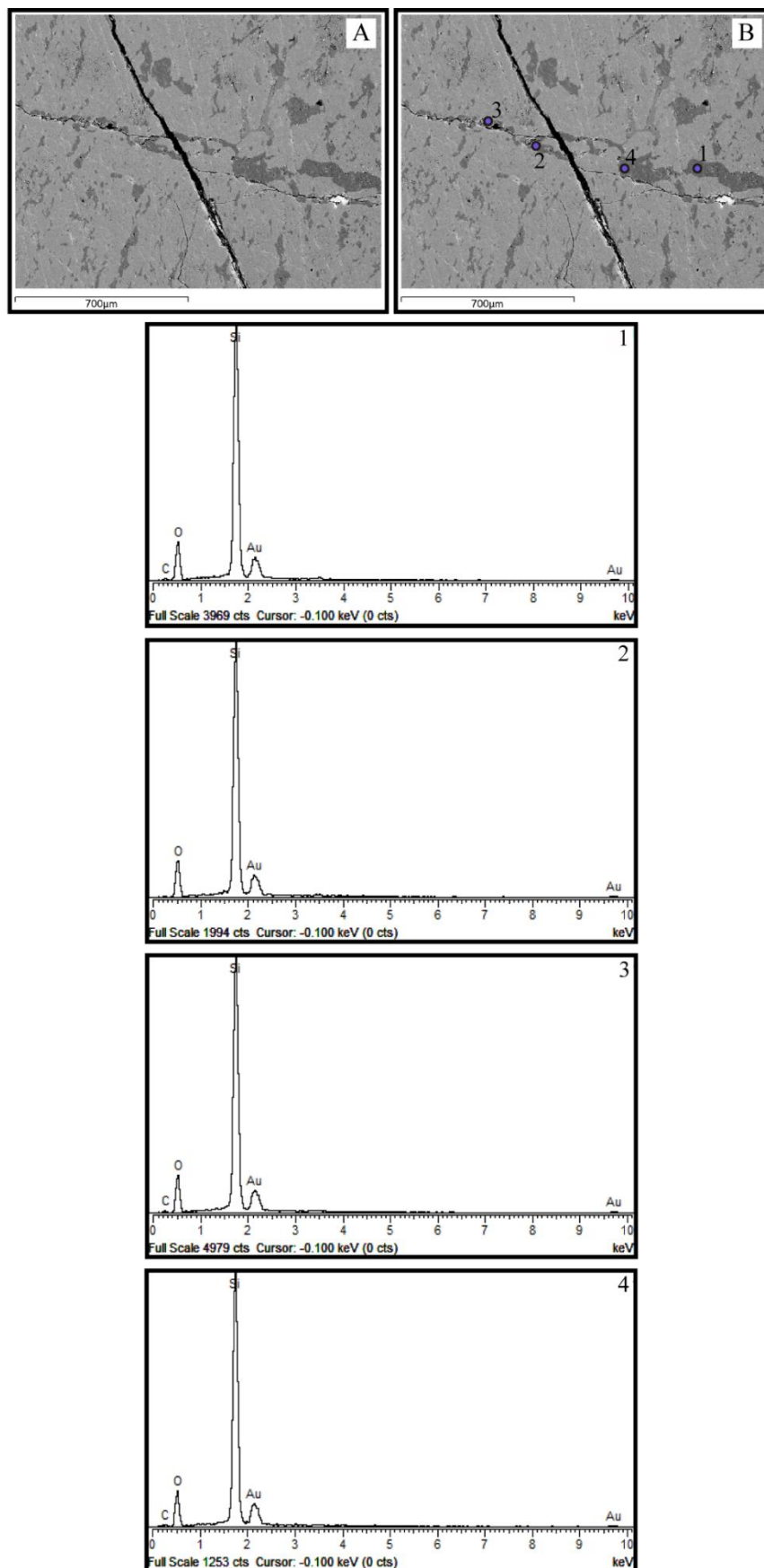


Figura A8.17 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-quartzo; 2-quartzo; 3-quartzo, 4-quartzo.

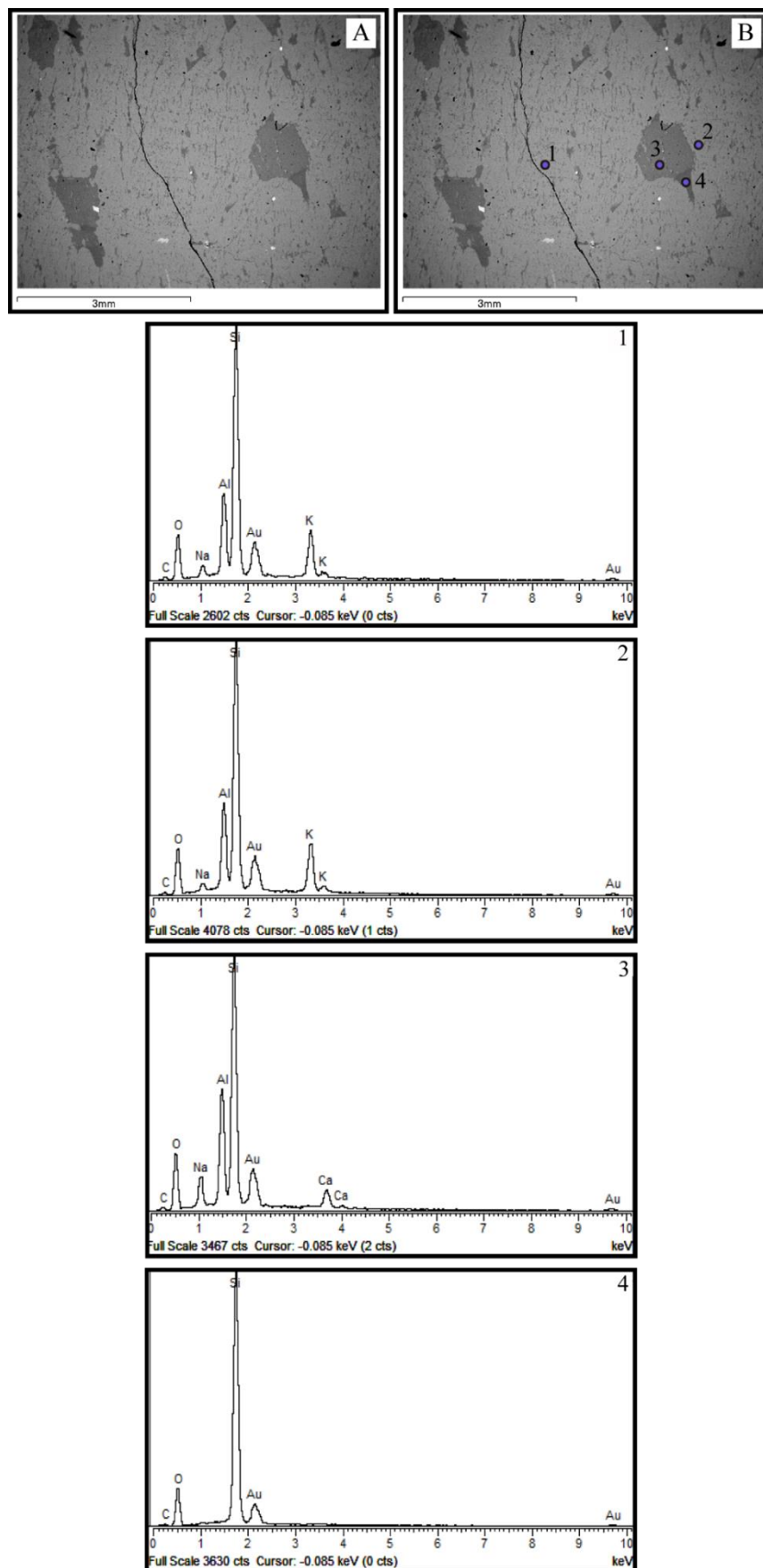


Figura A8.18 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-quartzo.

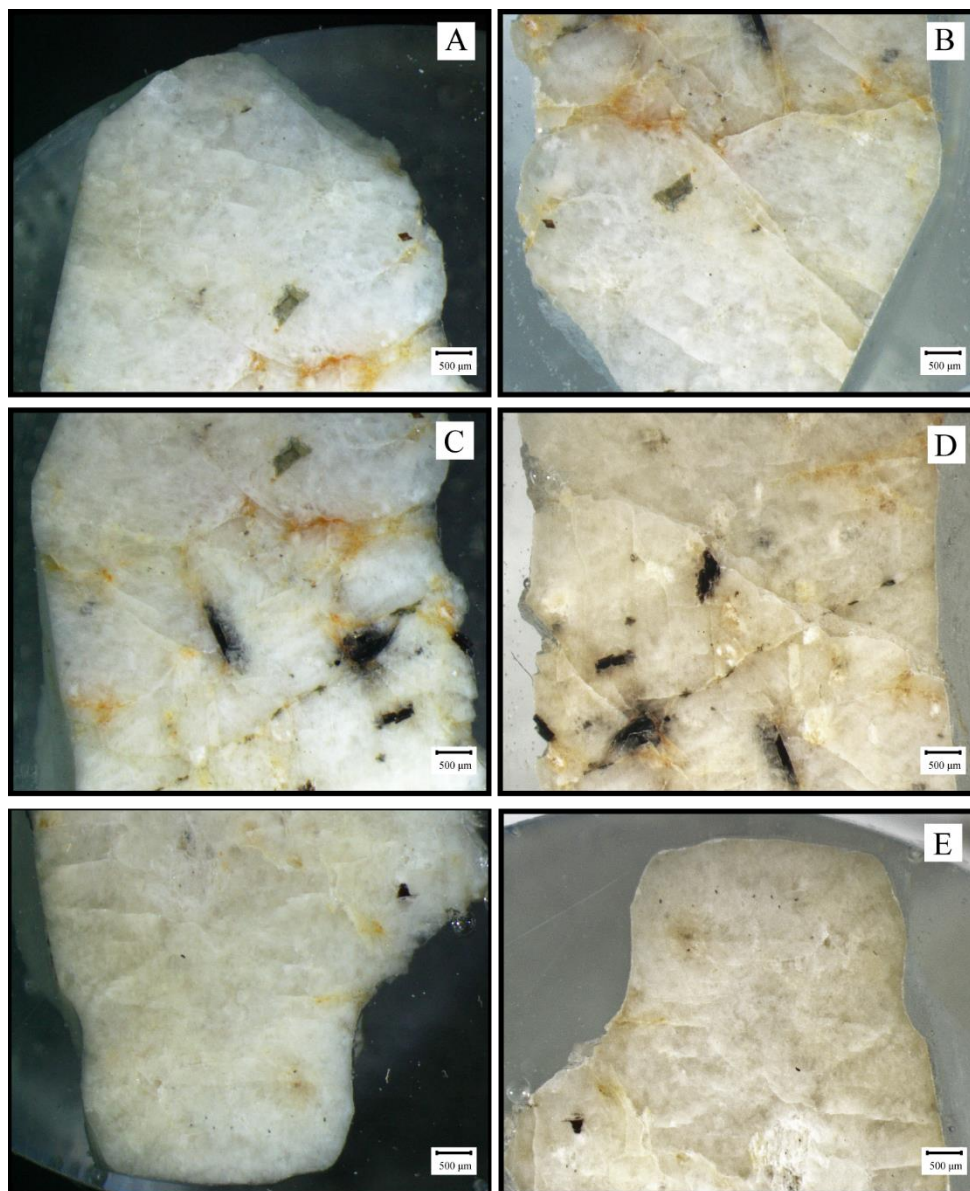


Figura A8.19 - Feldspato retirado da laje de granite alterado: A, C, E, G (antes da realização do ensaios); B, D, F, G (após o ensaio).

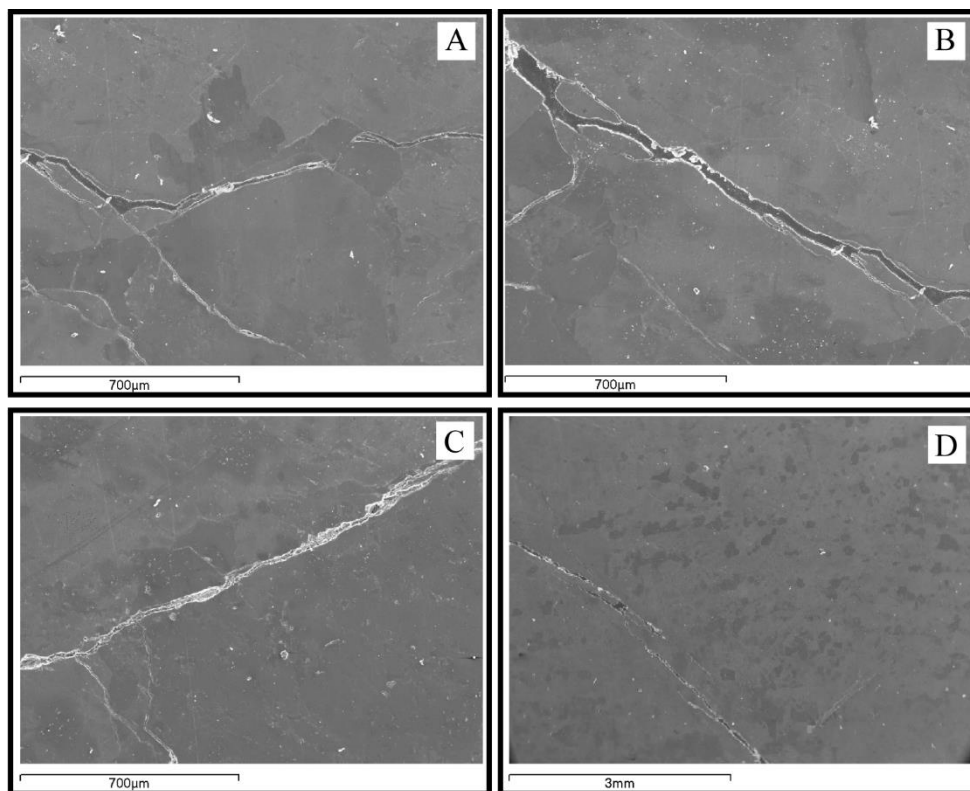


Figura A8.20 - Imagem de contraste topográfico obtidas ao MEV em eletrões secundários das diferentes áreas analisadas relativas a: A) Figura A8.21; B) Figura A8.22; C) Figura A8.23; D) Figura A8.24.

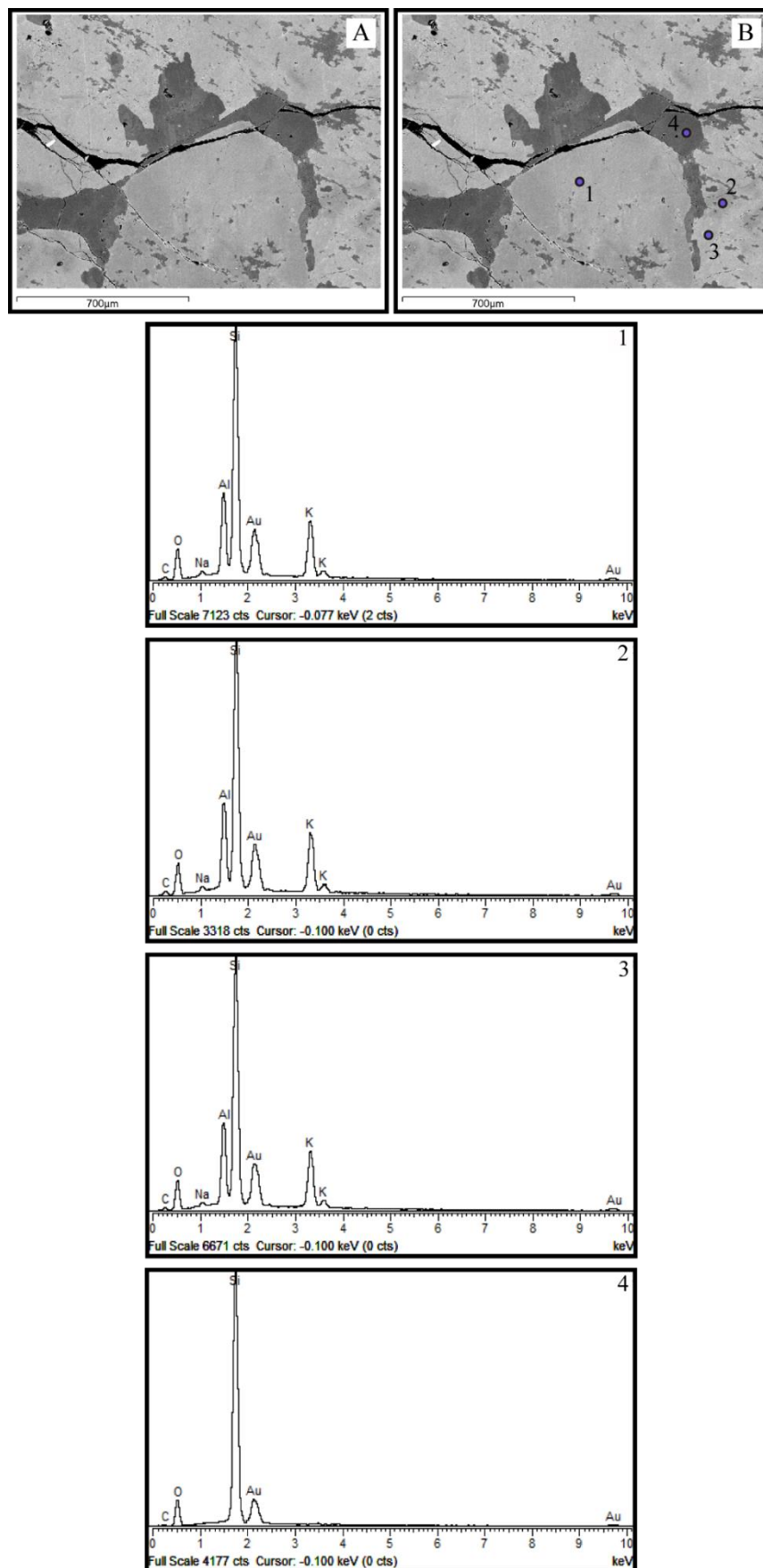


Figura A8.21 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-feldspato-K; 4-quartzo.

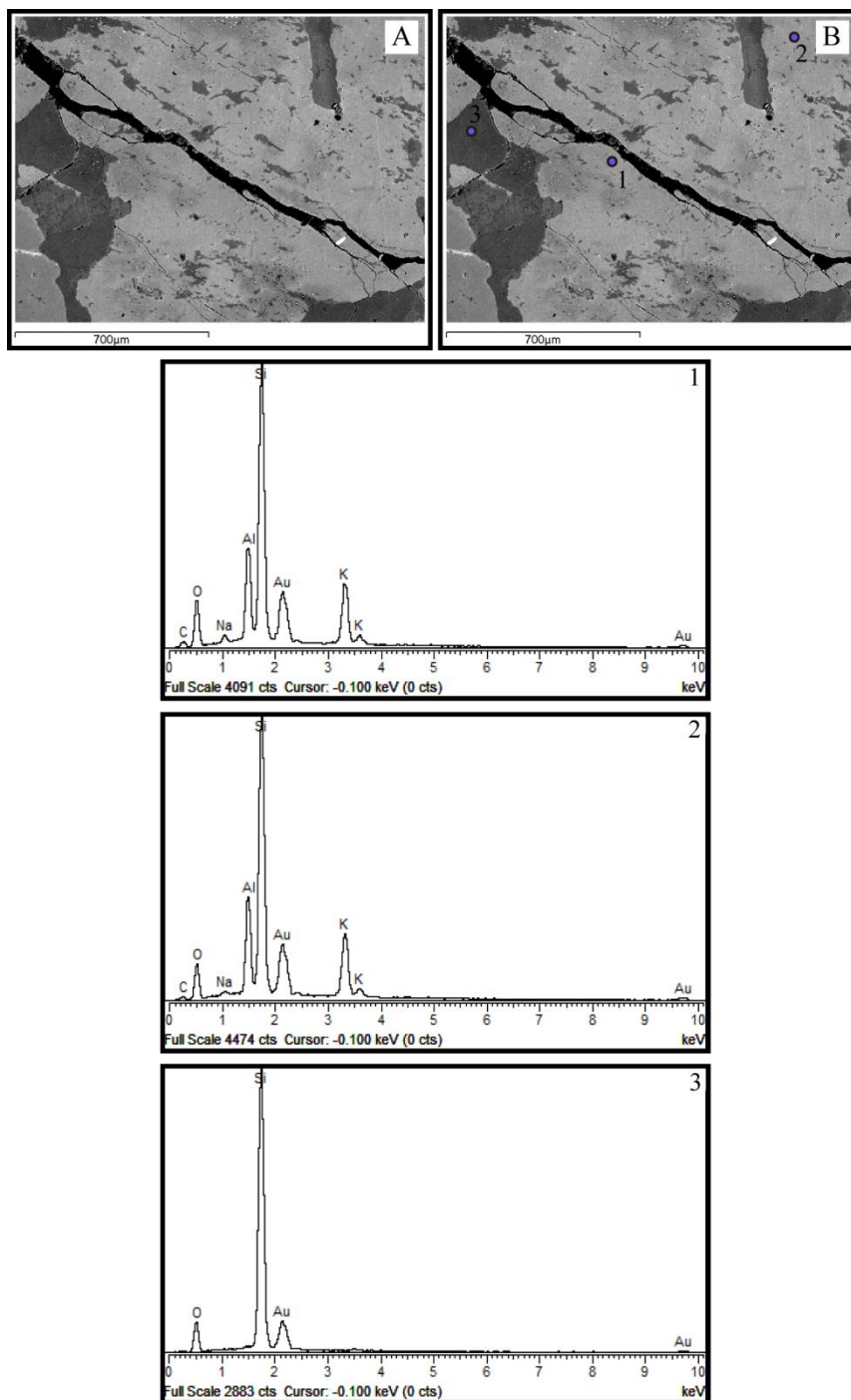


Figura A8.22 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1–feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-quartzo.

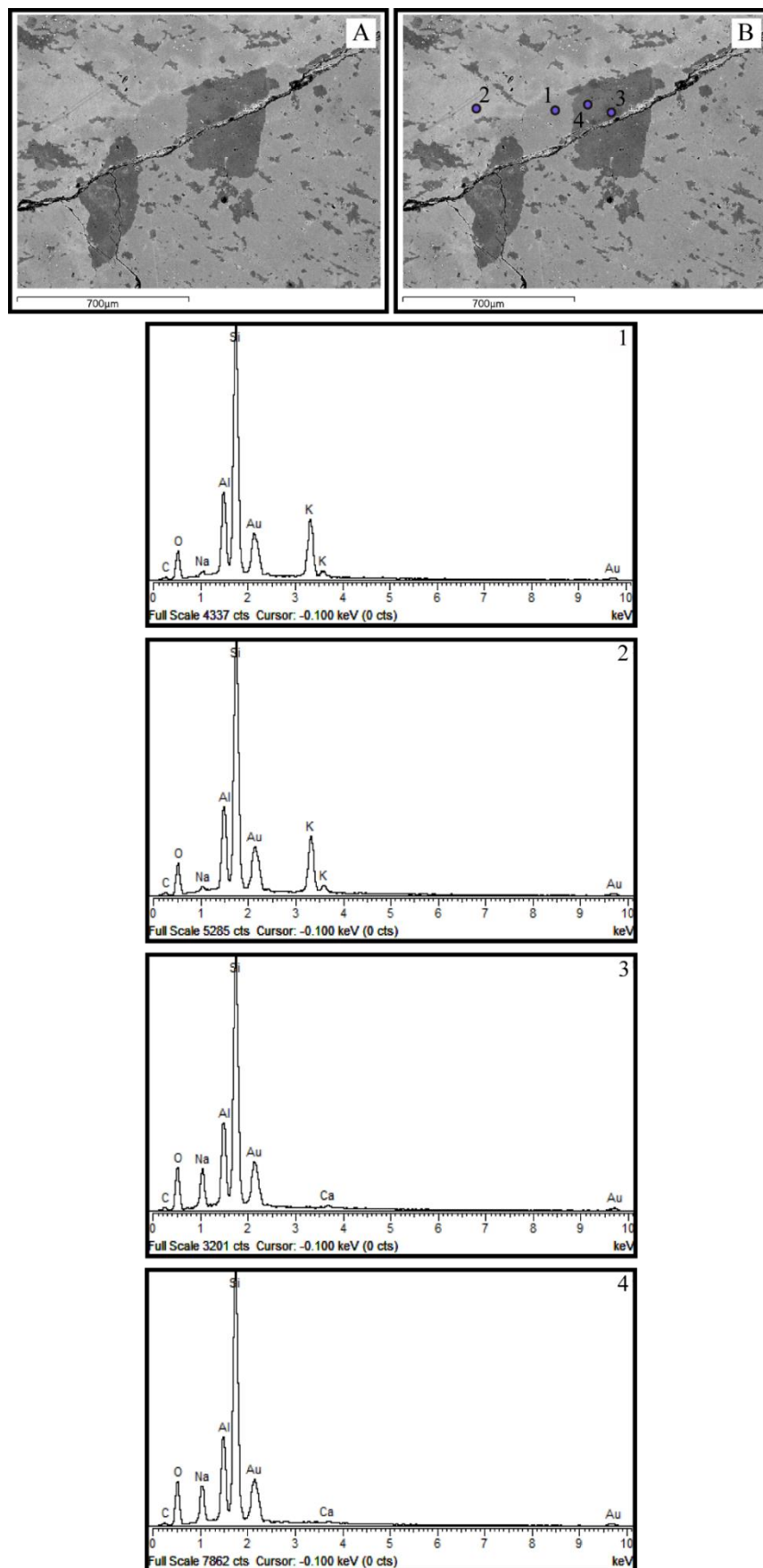


Figura A8.23 - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1-feldspato-K; 2-feldspato-K; 3-plagioclase, 4-plagioclase.

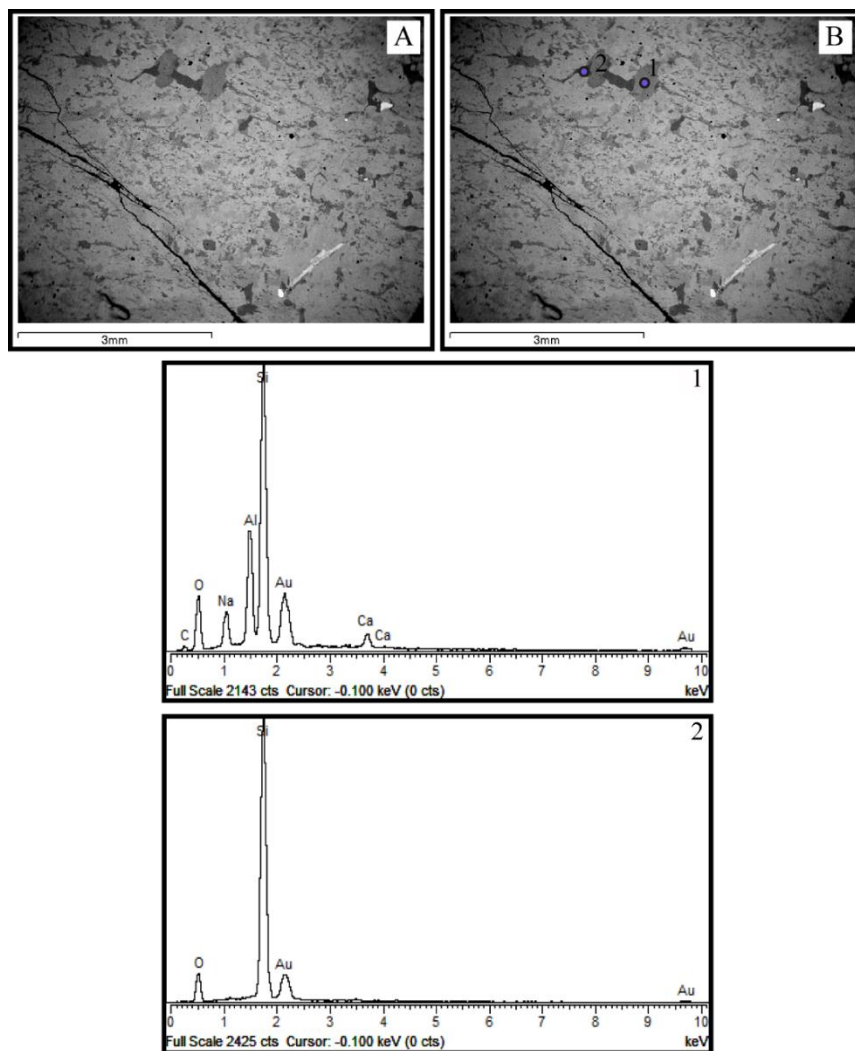


Figura A8.24 - - Imagens ao MEV (BSE) e espectros EDS. Na imagem B estão assinalados os locais de análises, indicando-se em cada espectro o número correspondente: 1—plagioclase; 2—quartz

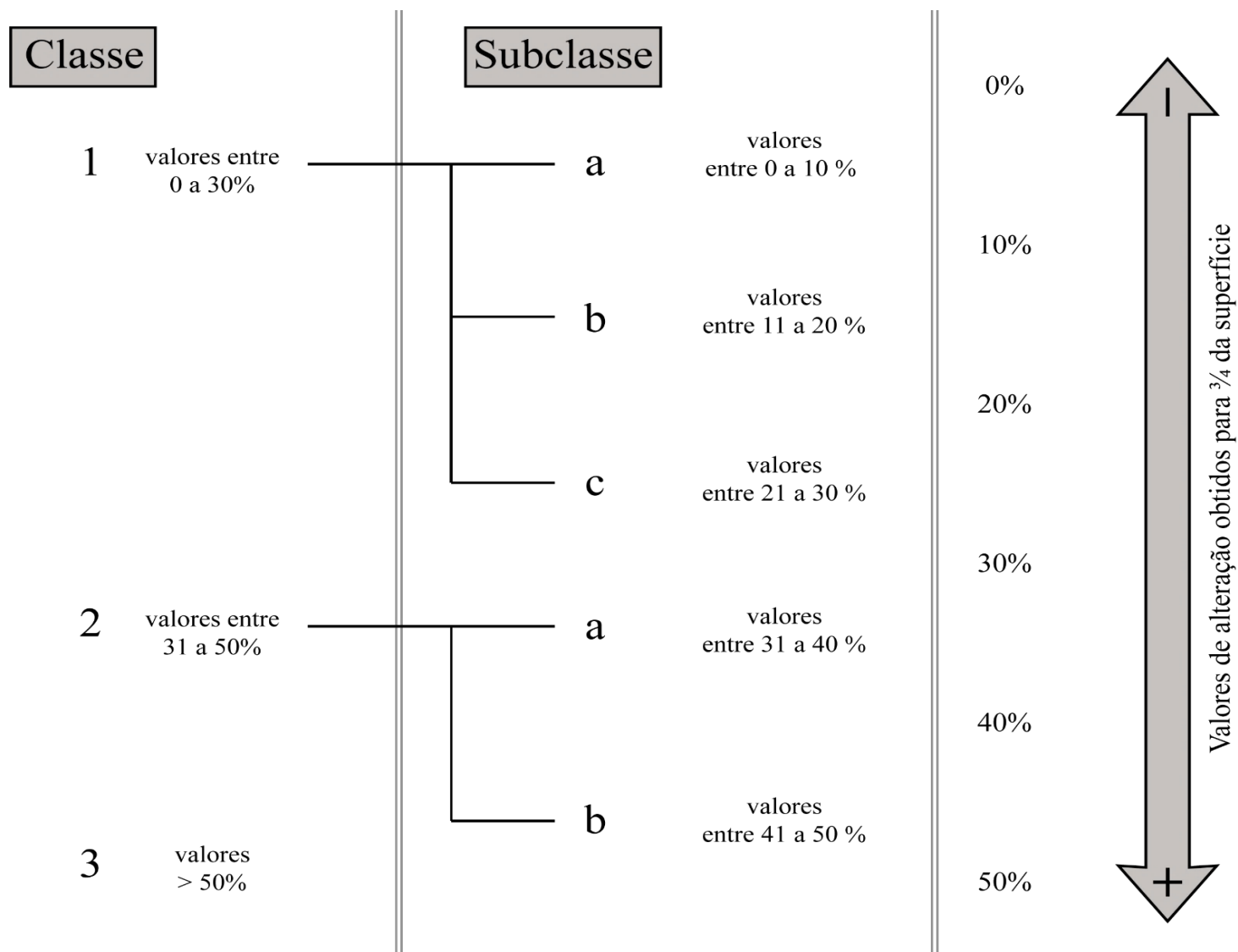


Figura A9 – Proposta de classificação de alteração para cristais de feldspato numa fração de agregado.

Classificação de agregados

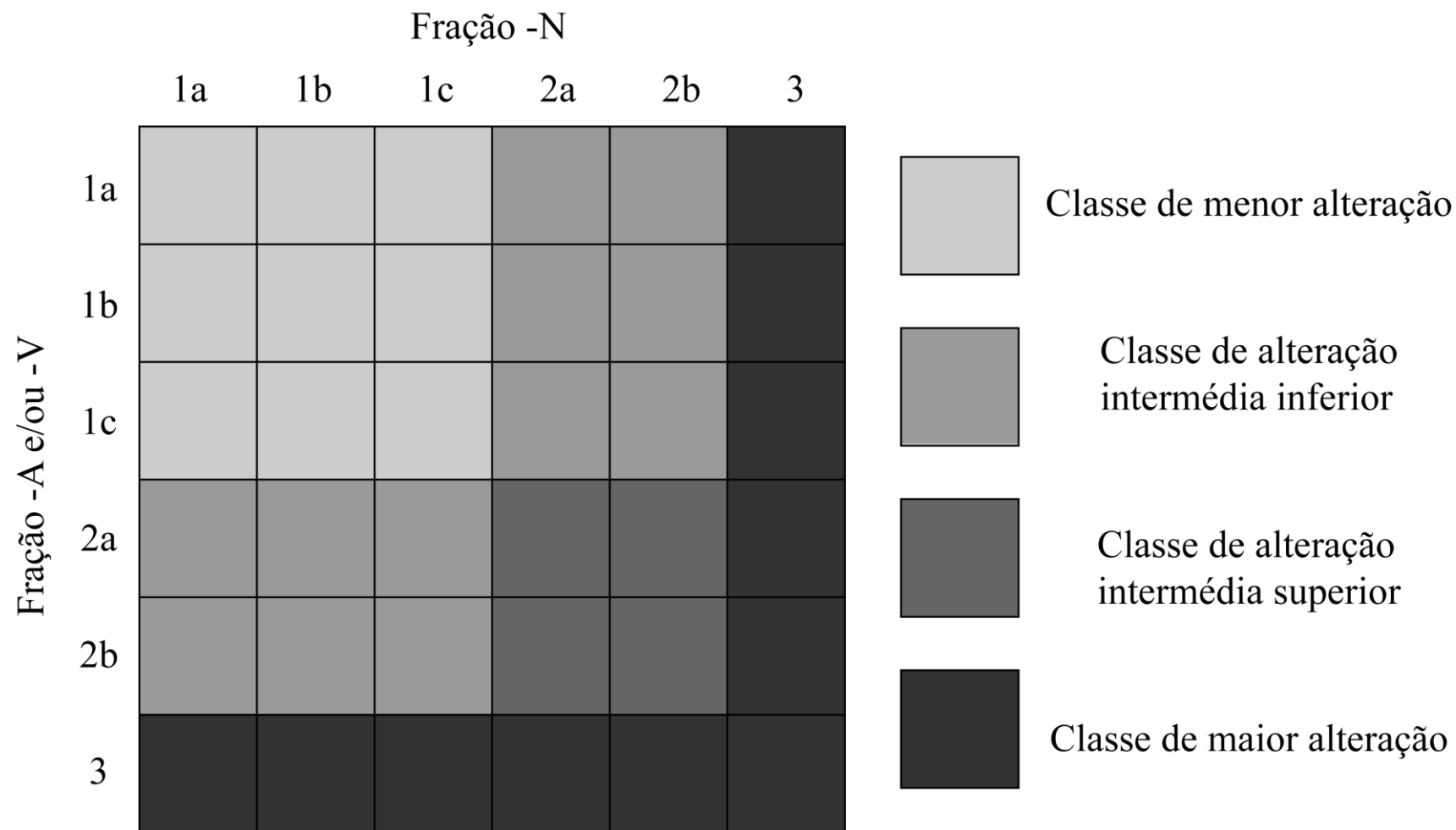


Figura A10 – Proposta de classificação para agregado a partir das obtidas para os respetivos cristais de feldspato de cada fração.

